

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación



Trabajo Fin de Grado

Desarrollo de nuevas estrategias para el aumento de eficiencia de
células solares

Autor: D^a. Laura Herriega Serna

Tutor/es: D. Fernando Bernabé Naranjo Vega

Susana María Fernández Ruano

2017

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Desarrollo de nuevas estrategias para el aumento de eficiencia de
células solares**

Autor: Laura Herriega Serna

Tutor/es: Fernando Bernabé Naranjo Vega

Susana María Fernández Ruano

TRIBUNAL:

Presidente: D. Francisco Javier Meca Meca

Vocal 1º: D. José Antonio Jiménez Calvo

Vocal 2º: D. Fernando Bernabé Naranjo Vega

FECHA: 18/07/2018

Índice

ÍNDICE.....	5
RESUMEN	11
PALABRAS CLAVE	12
ABSTRACT	13
KEYWORDS	14
RESUMEN EXTENDIDO	15
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	21
CAPÍTULO 1.....	23
MARCO TEÓRICO	23
1.1.- CÉLULA SOLAR. PRINCIPIO GENERAL DE FUNCIONAMIENTO.....	23
1.1.1.- LA LUZ SOLAR	25
1.2.- CLASIFICACIÓN DE CÉLULAS SOLARES. TRES GENERACIONES DE DISPOSITIVOS	28
1.2.1.- PRIMERA GENERACIÓN	28
1.2.2.- SEGUNDA GENERACIÓN.....	35
1.2.3.- TERCERA GENERACIÓN	39
1.3.- MATERIALES USADOS EN LA FABRICACIÓN DE CÉLULAS SOLARES	39
1.3.1.- MATERIALES SEMICONDUCTORES	40
1.3.2.- CONCEPTOS DE HOMOUNIÓN Y HETEROUNIÓN EN CÉLULAS SOLARES	46
1.4.- CARACTERIZACIÓN DE LAS CÉLULAS SOLARES	48
1.4.1.- EL PAPEL DE LA CAPA ANTI-REFLECTANTE: ARC	52
CAPÍTULO 2.....	61
DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL.....	61
2.1.- INTRODUCCIÓN	61
2.2.- ANÁLISIS MATEMÁTICO Y PRIMERAS SIMULACIONES	63
2.3.- MEJORAS INTRODUCIDAS EN EL CÓDIGO	70

CAPÍTULO 3.....	71
RESULTADOS	71
CAPÍTULO 4.....	77
CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS.....	77
4.1.- CONCLUSIONES	77
4.2.- FUTUROS TRABAJOS	78
DIAGRAMA DE BLOQUES	79
PLIEGO DE CONDICIONES.....	80
PRESUPUESTO	81
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.....	81
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.....	82
PRESUPUESTO TOTAL	82
MANUAL DE USUARIO	83
CONFIGURACIÓN DEL PROYECTO INICIAL	83
MOSTRAR Y EDITAR FIGURAS	86
BIBLIOGRAFÍA	89

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CÉLULA SOLAR DE MATERIAL SEMICONDUCTOR P-N.....	24
ILUSTRACIÓN 2: LAS MEJORES EFICIENCIAS EN CÉLULAS SOLARES	25
ILUSTRACIÓN 3: COMPORTAMIENTO DE LOS RAYOS SOLARES QUE INCIDEN EN LA ATMÓSFERA TERRESTRE	26
ILUSTRACIÓN 4: ESPECTRO DE IRRADIANCIA SOLAR.....	27
ILUSTRACIÓN 5: CÉLULAS BASADAS EN SILICIO (A) MONOCRISTALINO Y (B) MULTICRISTALINO	29
ILUSTRACIÓN 6: ESTRUCTURA DE UNA CÉLULA SOLAR	30
ILUSTRACIÓN 7: DIAGRAMA CON LA SECUENCIA DE FABRICACIÓN DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	30
ILUSTRACIÓN 8: LINGOTE DE SI MONOCRISTALINO REALIZADO POR EL MÉTODO CZOCHRALSKI.....	32
ILUSTRACIÓN 9: MÉTODO DE LA ZONA FLOTANTE	32
ILUSTRACIÓN 10: FUNCIONAMIENTO DE LA SERIGRAFÍA DE CÉLULAS SOLARES.....	35
ILUSTRACIÓN 11: ESTRUCTURAS DE CÉLULAS DE LÁMINA DELGADA CON (A) CONFIGURACIÓN DE SUBSTRATO Y (B) CONFIGURACIÓN DE SUPERESTRATO	38
ILUSTRACIÓN 12: SECCIÓN DE LA TABLA PERIÓDICA.....	40
ILUSTRACIÓN 13: DIAGRAMA DE BANDAS.....	41
ILUSTRACIÓN 14: ESTRUCTURA DE UN SEMICONDUCTOR	44
ILUSTRACIÓN 15: ESQUEMA DE UNA RED CRISTALINA DE SILICIO DOPADO CON IMPUREZAS	45
ILUSTRACIÓN 16: UNIÓN P-N.....	45
ILUSTRACIÓN 17: CÉLULA SOLAR DE SILICIO DE HETEROUNIÓN (SHJ).....	48
ILUSTRACIÓN 18: CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA [7].....	48
ILUSTRACIÓN 19: EL EFECTO DE LA LUZ EN LA CURVA IV. (A) SI ILUMINACIÓN, UNA CÉLULA SOLAR TIENE LAS MISMAS CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS QUE UN DIODO. (B) BAJO ILUMINACIÓN, LA CURVA IV SE DESPLAZA A MEDIDA QUE LA CÉLULA COMIENZA A GENERAR ENERGÍA. (C) CUANTO MAYOR ES LA INTENSIDAD DE LA LUZ, MAYOR ES EL DESPLAZAMIENTO [5].	50
ILUSTRACIÓN 20: COMPORTAMIENTO DE LA ONDA REFLEJADA EN EL ARC.....	52
ILUSTRACIÓN 21: DIAGRAMA SOBRE LAS LEYES BÁSICAS DE INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA	53
ILUSTRACIÓN 22: REFLEXIÓN Y LA REFRACCIÓN DE LA LUZ EN UNA INTERFAZ PLANA [3]	54
ILUSTRACIÓN 23: EFECTO EN LOS ESPECTROS DE REFLECTANCIA SEGÚN SE VAN AÑADIENDO (A) UNA CAPA Y (B) DOS CAPAS EN EL RECUBRIMIENTO.....	58
ILUSTRACIÓN 24: CÉLULA SOLAR CON UNA BICAPA DE AZO E ITO COMO CAPA ARC	62
ILUSTRACIÓN 25: ESPECTRO DE IRRADIANCIA SOLAR Y RESPUESTA ESPECTRAL DEL SILICIO.....	63
ILUSTRACIÓN 26: IRRADIANCIA SOLAR	65
ILUSTRACIÓN 27: EFICIENCIA CUÁNTICA INTERNA [5].....	65
ILUSTRACIÓN 28: ENERGÍA DEL FOTÓN EN FUNCIÓN DE SU LONGITUD DE ONDA ASOCIADA	66
ILUSTRACIÓN 29: ÍNDICES DE REFRACCIÓN DEL AZO (N1), DEL ITO (N2) Y DEL SILICIO (N3)	68

ILUSTRACIÓN 30: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN VS MEDIDAS EXPERIMENTALES (AWG1).....	72
ILUSTRACIÓN 31: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN VS MEDIDAS EXPERIMENTALES (AWG2).....	72
ILUSTRACIÓN 32: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN VS MEDIDAS EXPERIMENTALES (AWG3).....	72
ILUSTRACIÓN 33: ESPECTROS DE TRANSMISIÓN Y REFLECTANCIA DE LA BICAPA SOBRE VIDRIO AUMENTADO EL ESPESOR DE ITO	73
ILUSTRACIÓN 34: ESPECTROS DE TRANSMISIÓN Y REFLECTANCIA DE LA BICAPA SOBRE VIDRIO AUMENTADO EL ESPESOR DE AZO	74
ILUSTRACIÓN 35: REFLECTANCIA PONDERADA EN FUNCIÓN DE LOS ESPESORES DEL AZO Y EL ITO.....	75
ILUSTRACIÓN 36: TRANSMISIÓN PROMEDIO EN FUNCIÓN DE LOS ESPESORES DEL AZO Y EL ITO.....	75
ILUSTRACIÓN 37: J_{sc} EN FUNCIÓN DE LOS ESPESORES DEL AZO Y EL ITO.....	76
ILUSTRACIÓN 38: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO	79
ILUSTRACIÓN 39: CREAR NUEVO PROYECTO EN MATLAB	84
ILUSTRACIÓN 40: DESARROLLAR Y EDITAR EL PROGRAMA EN MATLAB.....	84
ILUSTRACIÓN 41: CÓDIGO DEL PROGRAMA DE MATLAB USANDO LA ECUACIÓN DE SELLMEIER	85
ILUSTRACIÓN 42: CÓDIGO DEL PROGRAMA DE MATLAB CON UN RANGO ESPECÍFICO DE VALORES DE ESPESORES DE LA BICAPA	85
ILUSTRACIÓN 43: EJECUTAR EL PROGRAMA EN MATLAB	85
ILUSTRACIÓN 44: VISUALIZAR EL CONTENIDO DE LAS VARIABLES EN MATLAB.....	86
ILUSTRACIÓN 45: MODIFICAR NOMBRE DE LOS EJES EN UNA FIGURA DE MATLAB.....	87
ILUSTRACIÓN 46: CAMBIAR ESCALA DE COLORES EN UNA FIGURA DE MATLAB.....	87
ILUSTRACIÓN 47: VISUALIZAR MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN UNA FIGURA DE MATLAB.....	88

Índice de tablas

TABLA 1: PROPIEDADES DE LOS TIPOS N Y P.....	43
TABLA 2: RANGO DE MEDIDAS PARA LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	55
TABLA 3: ÍNDICES DE REFRACCIÓN DE LOS MATERIALES MÁS UTILIZADOS EN RECUBRIMIENTOS	59
TABLA 4: COEFICIENTES DE SELLMEIER TOMADOS PARA LAS CAPAS DEL ARC.....	67
TABLA 5: COEFICIENTES DE SELLMEIER TOMADOS PARA EL SUBSTRATO.....	67
TABLA 6: ESTRUCTURAS DE ARC CONSIDERADAS A ESTUDIO.....	69
TABLA 7: OPTIMIZACIÓN DEL ARC	76

Índice de ecuaciones

ECUACIÓN 1: ECUACIÓN DE SHOCKLEY	49
ECUACIÓN 2: INTENSIDAD DE LA LUZ EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA.....	54
ECUACIÓN 3: ECUACIÓN DE SELLMEIER.....	56
ECUACIÓN 4: DENSIDAD DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO DE UNA CÉLULA SOLAR EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR INCIDENTE, LA TRANSMISIÓN DEL RECUBRIMIENTO Y LA EFICIENCIA CUÁNTICA INTERNA DE LA MISMA	64
ECUACIÓN 5: ENERGÍA DEL FOTÓN EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA	65
ECUACIÓN 6: APROXIMACIÓN ADOPTADA A LA ECUACIÓN DE SELLMEIER PARA LAS CAPAS DEL ARC	67
ECUACIÓN 7: APROXIMACIÓN ADOPTADA A LA ECUACIÓN DE SELLMEIER MODIFICADA PARA EL SUBSTRATO	67
ECUACIÓN 8: PARÁMETROS ÓPTICOS EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN DEL ESPECTRO DE REFLECTANCIA DEL ARC	68
ECUACIÓN 9: REFLECTANCIA.....	69
ECUACIÓN 10: TRANSMISIÓN DE LA BICAPA	69
ECUACIÓN 11: REFLECTANCIA PONDERADA	70
ECUACIÓN 12: TRANSMISIÓN PROMEDIO	70

Resumen

En el presente documento de trabajo de fin de grado se ha desarrollado una herramienta basada en Matlab para poder optimizar estructuras de capas anti-reflectantes (ARC) basadas en bicapas de óxidos conductores transparentes. Estos recubrimientos ARC son clave en una célula solar basada en silicio puesto que permiten reducir las pérdidas por reflexión del dispositivo, y así aumentar su eficiencia. En la implementación se emplearán los índices de refracción y los espesores de los distintos materiales que constituyen cada capa del diseño del ARC con el objetivo de determinar las propiedades ópticas del conjunto y su efecto en los parámetros del dispositivo. Asimismo, la herramienta desarrollada permitirá obtener las figuras de mérito de los recubrimientos como por ejemplo, la transmisión promedio en el intervalo de respuesta del dispositivo solar, la reflectancia ponderada al espectro AM1.5G del conjunto, y la densidad de corriente de cortocircuito de la célula solar y, por último, establecer una comparativa con medidas experimentales. De este modo, se podrá valorar la bondad de la herramienta desarrollada que permitirá seleccionar la estructura de capa antirreflectante que resulte más adecuada para la célula solar.

Palabras clave

Célula solar, capa anti-reflectante, óxidos conductores transparentes, energía de gap, electrón-hueco, reflectancia.

Abstract

Throughout this paper a tool based on Matlab has been developed to optimize antireflection coating (ARC) structures based on bilayers of oxide transparent materials. These ARC are vital in a silicon solar cell in order to reduce the reflection losses of the device and increase its efficiency. In the implementation, the refractive indexes and the thicknesses of the different materials that characterize each layer of the ARC design will be used with the purpose of determining the optical properties and its effect on the parameters of the device. In addition, the developed tool will allow to obtain the figure of merit of the developed coatings such as the average transmission in the response range of the solar device, the weighted reflectance to the AM1.5G spectrum, and the short-circuit photocurrent density of the solar cell and, finally, to determine a comparison with experimental measurements. In this way, the goodness of the developed tool can be valued, in order to be applied to select the antireflection coating structure most suitable for a given solar cell.

Keywords

Solar cell, antireflection coating, transparent conductive oxides, band-gap, electron-hole, reflectance.

Resumen extendido

Este trabajo de fin de grado se ha realizado como la etapa final para completar el Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación (GITT) en la Universidad de Alcalá (EPS). Durante el período de estudio, se ha trabajado bajo la supervisión diaria del profesor Fernando B. Naranjo Vega y la colaboración del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) a mano de Susana María Fernández.

El hecho de que la energía solar fotovoltaica esté resultando una opción viable como energía limpia, sostenible y segura está haciendo que aumente el atractivo en este sector por desarrollar nuevas tecnologías. El objetivo principal de estas investigaciones es continuar incrementando la eficiencia de los dispositivos solares. Aunque en algunas tecnologías la eficiencia actual está muy lejos de su límite teórico, se continúa trabajando en ello, puesto que la energía solar fotovoltaica representa una solución real de abastecimiento de energía, que depende de una fuente inagotable como es el sol.

El objetivo de este proyecto es mejorar el rendimiento de la célula solar de heterounión de silicio. Como fase inicial, se hizo una búsqueda de información sobre el estado del arte en la tecnología de células solares que usan el silicio cristalino como absorbente en libros, artículos, estudios y páginas web. Así como la investigación de distintas estrategias tecnológicas que permitan una mejora de la eficiencia del dispositivo. A continuación, se desarrolló una herramienta para la optimización de capas anti-reflectantes (ARC) para células solares. Una vez hecho esto, se llevaron a cabo simulaciones y optimizaciones para optimizar la aplicación de recubrimientos anti-reflectantes a una célula solar en concreto. La fiabilidad de las simulaciones se validó teniendo en cuenta resultados experimentales obtenidos en el CIEMAT.

El entorno desarrollado permite estudiar el efecto que tienen los materiales elegidos para la capa antirreflectante. En concreto, se ha aplicado un modelo de ARC basado en una

bicapa de dos óxidos conductores transparentes, $In_2O_3:Sn$ (ITO) y $ZnO:Al$ (AZO); parámetros como el índice de refracción y el espesor de cada material son cruciales en nuestro estudio. Dentro del margen de longitudes de onda que definen el rango de trabajo, se va a estudiar el efecto del espesor de las capas involucradas para disminuir la reflectancia de la bicapa.

El efecto de la capa ARC sobre las características de la célula solar se evaluará a través de la máxima densidad de corriente en cortocircuito (J_{sc}) esperable en la misma. Para la obtención de J_{sc} , la herramienta desarrollada tendrá en cuenta la Transmisión (T) y la Reflectancia (R) de la bicapa ARC, así como la eficiencia interna de la célula, todo ello en el rango de longitudes de onda desde 350 nm a 1200 nm y considerando una radiación incidente de AM1.5.

A continuación se describen brevemente los cuatro capítulos en los que se divide este documento. En el capítulo 1 describe el principio de funcionamiento de las células solares, así como las distintas generaciones que existen en el mercado fotovoltaico y los materiales empleados en los procesos de fabricación de las mismas. Por último, se introducen las propiedades ópticas y eléctricas del dispositivo; especialmente en lo que concierne al recubrimiento antirreflectante. En el capítulo 2 se presenta una base matemática y la descripción del código implementado durante este trabajo. En el capítulo 3 se exponen los resultados de las simulaciones, así como una comparación con resultados experimentales para comprobar la bondad del programa desarrollado. Finalmente, en el capítulo 4 se presentan las conclusiones y trabajo futuro del estudio. Además de estos capítulos, en el trabajo se recoge un diagrama de bloques, pliego de condiciones necesarias para realizar el trabajo, el presupuesto total y un manual de usuario de la herramienta desarrollada en Matlab.

Introducción

El cambio climático es uno de los principales problemas ambientales al que nos llevamos enfrentando en los últimos años debido al continuo crecimiento y acumulación de las emisiones de gases invernadero (GEI) en la atmósfera, generados en su mayoría por actividades humanas. Gran parte de estas emisiones provienen del sector energético en sus diversas formas. Para afrontar este problema, es necesario un cambio importante y profundo en los sistemas energéticos actuales. Hasta ahora, la mitigación de las emisiones de GEI ha sido más bien limitada, por lo que están empezando a adquirir cierto protagonismo las energías renovables. Se han ganado esa importancia debido a que estas energías provienen de fuentes naturales. Esto hace que resulten ser virtualmente inagotables y logren regenerarse por medios naturales. Asimismo, son más respetuosas con el medio ambiente y gracias a que utilizan recursos autóctonos, se permite reducir la dependencia energética de terceros países. Para abordar esta problemática a nivel mundial, se está trabajando en el desarrollo de una nueva política energética donde se fomente el uso de las energías renovables. El alcanzar los objetivos marcados a largo plazo dentro de esta política energética requiere de una transición energética paulatina donde el consumidor adquiere un papel muy importante, y donde es necesaria una concienciación por parte de la población. De entre las energías renovables destaca la energía solar fotovoltaica, que a día de hoy y gracias a la bajada reiterada de sus costes, está siendo una energía limpia cada vez más competitiva. La base de este crecimiento reside en el elevado consumo de energía eléctrica en el mundo, que se dispara cada año, y en el hecho de que el suministro de electricidad se vuelve cada vez más difícil. En este punto, el rápido crecimiento consistente y sostenido a nivel mundial de la energía solar fotovoltaica se debe básicamente a la reducción de sus costes gracias a su madurez tecnológica alcanzada. Tanto es así que la solar fotovoltaica es la tecnología renovable que más se ha instalado durante el año 2016 con un 47%. Esto ha supuesto que el coste de generación de energía mediante

solar fotovoltaica haya disminuido en un 73% en el año 2017, alcanzando los 0.1 €/kWh, y convirtiéndose, así, en una energía rentable capaz de competir a día de hoy con los precios de la energía generada con combustibles fósiles.

Teniendo esto presente, el propósito de este trabajo es estudiar, valorar y desarrollar nuevas estrategias de mejora de absorción de la luz que permitan incrementar la eficiencia de células solares. En concreto, se pretende evaluar diseños específicos de capas anti-reflectantes (ARC) que permitan la minimización de las pérdidas ópticas por reflexión en el dispositivo solar. Los dispositivos solares en los que nos centraremos serán células de heterounión de silicio, basadas en silicio cristalino como absorbente que, como se presenta a continuación, representan una tecnología eficiente y en continuo estudio. Para ello, se ha desarrollado una herramienta de simulación en Matlab con la que se pueden obtener mapas de transmisión promedio (T_p) y de reflectancia ponderada (R_p) en el intervalo del espectro visible que abarca el rango de longitudes de onda desde 350 nm hasta 1200 nm, así como el efecto que la modificación de la estructura del ARC tiene sobre la densidad de corriente de corto-circuito (J_{sc}). Para validar los resultados teóricos se ha contado con datos experimentales aportados por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), con el que se ha realizado este trabajo en colaboración.

Una célula solar es un dispositivo electrónico que consigue convertir la energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica. Entender cómo opera una célula fotovoltaica no es sencillo; cuando la luz solar incide sobre el dispositivo semiconductor, las partículas de luz (fotones) son absorbidas. En ese momento tiene lugar el efecto fotoeléctrico, gracias al cual se emiten electrones libres, que son finalmente capturados, generándose así la electricidad. Las células fotovoltaicas, conectadas entre sí, son los componentes básicos de un módulo fotovoltaico, gracias al cual, se puede hacer uso de la electricidad generada por cada unidad básica que lo constituye. Estos módulos solares proporcionan corriente continua, por lo que, para hacer uso de la electricidad, solamente

haría falta convertir la corriente continua en alterna. Para ello, se emplean unos dispositivos electrónicos llamados inversores.

Las células solares se clasifican en tres generaciones en función del desarrollo de la tecnología que emplean, así como de relevancia que han ido teniendo a lo largo del tiempo. En el presente, tienen gran representación comercial las células de la primera generación. Entre los principales motivos de esta elevada penetración de mercado se encuentran la alta calidad de la materia prima, su gran área y su elevado grado de avance tecnológico. Se ha logrado una eficiencia experimental del 26.7% en el caso del silicio monocristalino y 21.9% para el silicio multicristalino. En concreto, este trabajo se centrará en las células de esta primera generación, debido a la gran penetración que tienen en la industria fotovoltaica.

Con el objetivo de reducir los costes de producción, nacen las células de la segunda generación. Se usan nuevas técnicas de fabricación y nuevos materiales absorbentes en lámina delgada como es el caso de películas finas de telurio de cadmio (CdTe), aleaciones de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS), de silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) y de silicio microcristalino (μc). La eficiencia de conversión de esta segunda generación de células solares se encuentra entre el 5% y el 22.6%, aunque se espera que en un futuro puedan superar el 25%. Hoy en día representa cuotas de mercado alrededor de un 5.1%, siendo las más comercializadas las de CdTe, con un 3.1%.

Por último, las células de la tercera generación emplean conceptos avanzados y novedosos, lográndose alcanzar unas eficiencias de conversión eléctrica en laboratorios mucho mayores y a un precio más bajo. El rango de eficiencia teórico está comprendido entre un 30% y un 60%. En este aspecto, los grandes talones de Aquiles de esta nueva generación son la estabilidad y durabilidad, así como el escalado a grandes áreas. Por estos motivos aún no se han comercializado.

Son las células de primera generación, y en concreto las basadas en silicio, las que dominan el mercado con un 90% de cuota. En una célula comercial de silicio cristalino el

material importante es la oblea de silicio, que es la materia prima del dispositivo. En primer lugar se fabrica la oblea de silicio cristalino y, una vez obtenida y cortada, se preparan y se continúa con el paso de texturado. Este paso es importante, ya que hay que limpiar las obleas y eliminar los posibles daños producidos por la sierra tras el corte de los lingotes. Acto seguido, se forma el emisor mediante un proceso de difusión para formar la unión p-n, y posteriormente, se realiza el aislamiento de bordes. Después se deposita una capa anti-reflectante y pasivante. Normalmente, esta capa va a ser de nitruro de silicio (SiN_x) con el objetivo de disminuir la reflectividad del conjunto de la célula. Por último, se depositan los contactos metálicos mediante serigrafía y se realiza su recocido [1].

Hoy en día se trabaja en la búsqueda de estrategias tecnológicas que permitan mejorar las prestaciones de las células de silicio cristalino. En concreto, se están sustituyendo las obleas tipo p por obleas tipo n, puesto que sufren una menor degradación y se requieren menos esfuerzos para conseguir obleas de calidad suficiente. Asimismo, se está reduciendo la cantidad de materia prima, haciendo obleas de silicio más delgadas y se intenta evitar la dependencia de plata como contacto, entre otras [2].

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es llegar a comprender la utilidad de las células solares y la importancia de optimizarlas. Para ello, se ha recabado información sobre el estado del arte en procesos de optimización de la eficiencia de células solares. En concreto, se persigue conocer los procesos empleados para aumentar la eficiencia utilizando electrodos anti-reflectantes.

Para estudiar el efecto de dicha capa anti-reflectante, se ha desarrollado una herramienta de simulación en Matlab, que permita estudiar la relación entre las propiedades ópticas (índice de refracción) y el espesor de cada capa y su efecto sobre la eficiencia esperada en la célula solar, a través de la J_{sc} de la misma. Este estudio tiene aplicación directa en el campo de la energía renovable.

Capítulo 1

Marco teórico

A continuación se van a describir (i) el principio de funcionamiento de una célula solar, (ii) los tipos de células que hay en la actualidad así como (iii) sus pasos de fabricación, haciendo énfasis en los dispositivos basados en silicio cristalino. Por último, se abordará (iv) la caracterización de la célula solar, centrando el estudio en el ARC.

1.1.- Célula Solar. Principio general de funcionamiento

La unidad básica que se encarga de convertir directamente la luz solar en electricidad es la célula solar, mediante el efecto fotovoltaico. Este efecto fue observado por primera vez en 1839 por Alexander E. Bequerel, que descubrió cómo cambiaba la corriente de conducción en una celda electrolítica al cambiar la intensidad de la luz. En 1876 Adams y Day observaron este mismo fenómeno con selenio sólido, lo que dio lugar a que en 1886 Fritts fabricara la primera célula solar fotovoltaica basada en este material.

Estos dispositivos electrónicos están fabricados con materiales semiconductores, uno dopado tipo p y otro dopado tipo n. Cuando la unión de estos materiales se exponen a la luz solar, los fotones que inciden sobre la misma con energía suficiente generan pares electrón-hueco; este paso es conocido como absorción. Posteriormente, los pares electrón-hueco que no se recombinan, se reparten por el dispositivo de forma que, los electrones van hacia el terminal negativo y los huecos hacia el positivo. En base a esto, se produce una diferencia de potencial entre los terminales de la célula generando energía eléctrica.

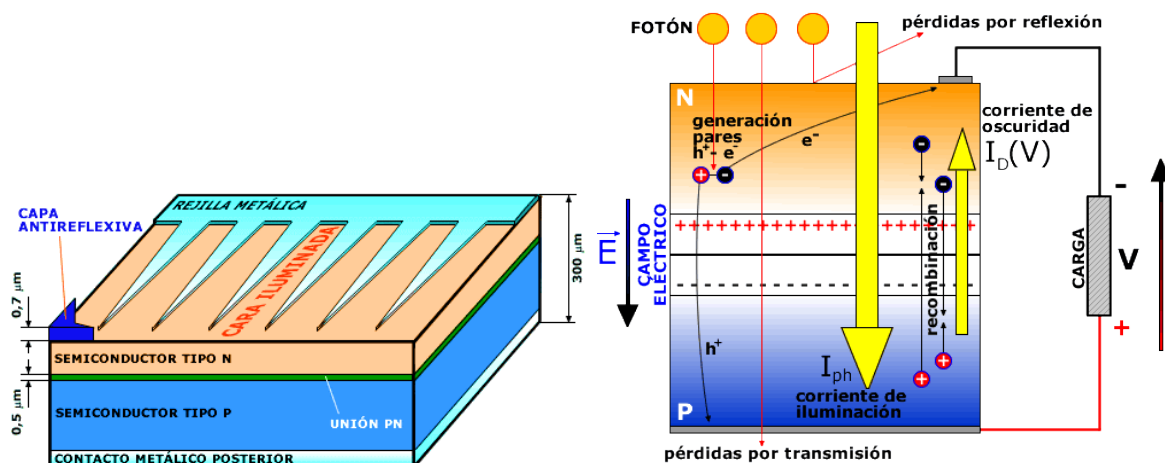


Ilustración 1: Principio de funcionamiento de una célula solar de material semiconductor p-n

La eficiencia de conversión de energía de una célula solar se define como la relación entre la energía eléctrica generada por la célula y la energía solar que incide sobre ella, es decir, la cantidad de potencia que se produce de toda la total que se recibe. Este parámetro resulta muy interesante, ya que va a ser un indicativo del rendimiento de la célula.

La eficiencia de conversión depende en gran medida de la eficiencia cuántica (QE). Se consideran dos tipos de QE: la eficiencia cuántica externa (EQE) y la eficiencia cuántica interna (IQE). El EQE es la relación entre el número de pares de electrón-hueco recogidos y el número de fotones que inciden en el dispositivo. Por otro lado, el IQE es la relación entre el número de pares de electrón-hueco recogidos y la cantidad de fotones absorbidos [3].

En la Ilustración 2 se presenta cómo ha ido evolucionando con el paso del tiempo la eficiencia de las células solares de laboratorio según la tecnología. El estudio es realizado por el laboratorio estadounidense NREL (National Renewable Energy Laboratory) y representa el grado de avance de cada tecnología.

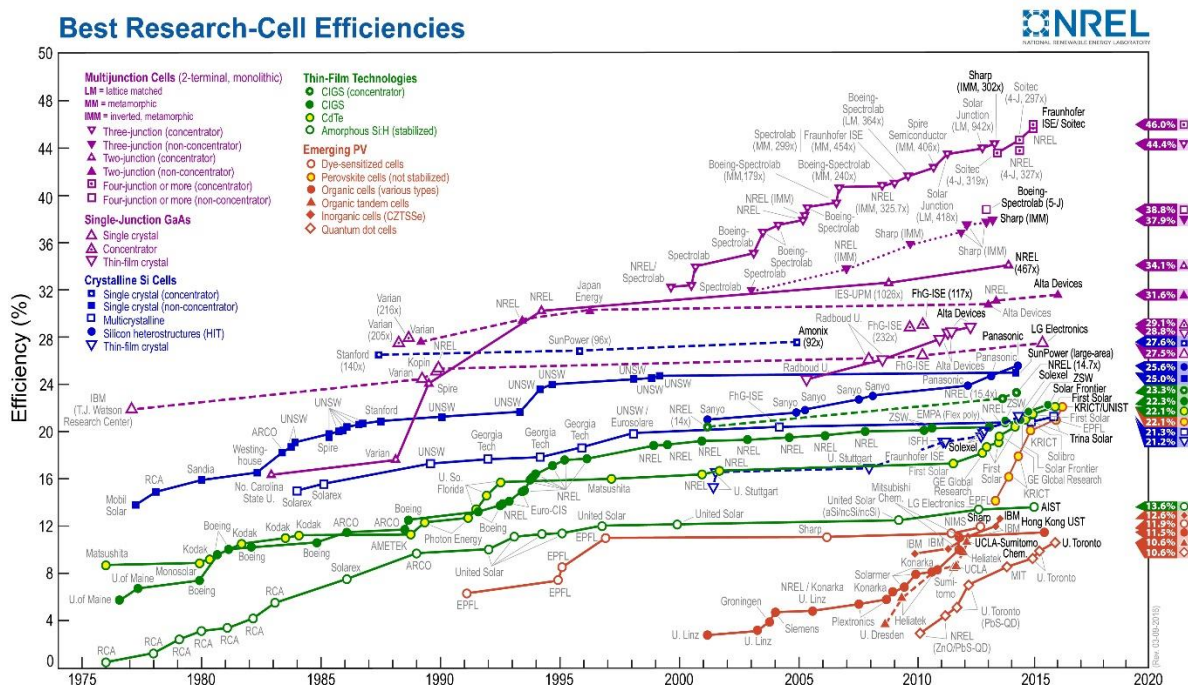


Ilustración 2: Las mejores eficiencias en células solares

1.1.1.- La luz solar

Los rayos solares que inciden en la superficie terrestre sufren un importante impacto atmosférico, ya que se ven afectados por la absorción y el scattering. Además, la radiación solar también se ve afectada por los cambios locales que ocurren en la composición de la atmósfera, como la polución y el vapor de agua, que afectan a la direccionalidad y la densidad de potencia de la radiación. El polvo, los gases y aerosoles por los que pasa la radiación solar absorben los fotones incidentes dando lugar al fenómeno conocido como absorción. Se evalúa una absorción del orden de 16-24% del total de radiación incidente sobre la atmósfera.

Por otro lado, el scattering puede diferenciarse por dos fuentes principales: scattering Rayleigh y Mie. Las moléculas que se encuentran en la atmósfera terrestre causan el scattering Rayleigh; mientras que el scattering Mie se produce debido al polvo y los aerosoles. Este fenómeno hace que la luz cambie de dirección, derivando en lo que se conoce como “luz difusa”. En consecuencia, la energía que llega a la superficie terrestre consta de dos componentes, la radiación directa y la radiación difusa. Para evaluar la radiación solar se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- El espectro de la luz incidente.
- La Irradiancia solar.
- El ángulo de incidencia.

Se conoce como irradiancia a la densidad de potencia de la radiación solar y la eficiencia de las células solares es sensible a variaciones que se produzcan en este parámetro y a la naturaleza espectral de la luz solar. Para facilitar la comparación de las medidas tomadas en diferentes células solares, se han estandarizado la densidad del espectro de luz solar y la potencia, tanto para la radiación fuera de la atmósfera de terrestre, como para la superficie de la Tierra; de esta forma, todas las eficiencias se refieren a la misma energía incidente [4].

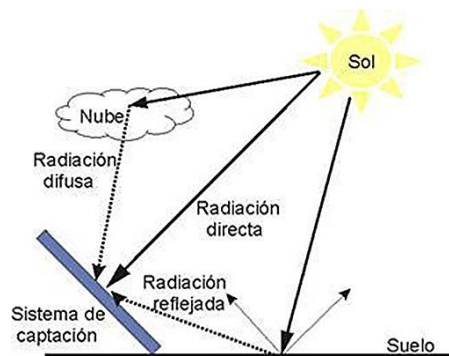


Ilustración 3: Comportamiento de los rayos solares que inciden en la atmósfera terrestre

Es importante el concepto de irradiancia, ya que en una célula solar la producción de corriente va a depender de este parámetro. Se refiere al nivel de iluminación, de forma que a medida que aumenta la irradiancia, aumenta la intensidad a través de la célula.

El estándar más común en las células solares es el denominado AM1.5G (Air Mass 1.5 Global), ya que es el espectro estándar que se encuentra en la superficie de la Tierra (Ilustración 4). La irradiancia solar en la superficie terrestre representa la constante solar y es 1000 W/m^2 . Es importante destacar un segundo estándar que hace referencia al espectro solar fuera de la atmósfera y se utiliza para predecir el comportamiento de las células solares en el espacio, se llama AM0. Este espectro resulta de gran interés, ya que se utiliza para estimar el rendimiento de las células en el espacio [5].

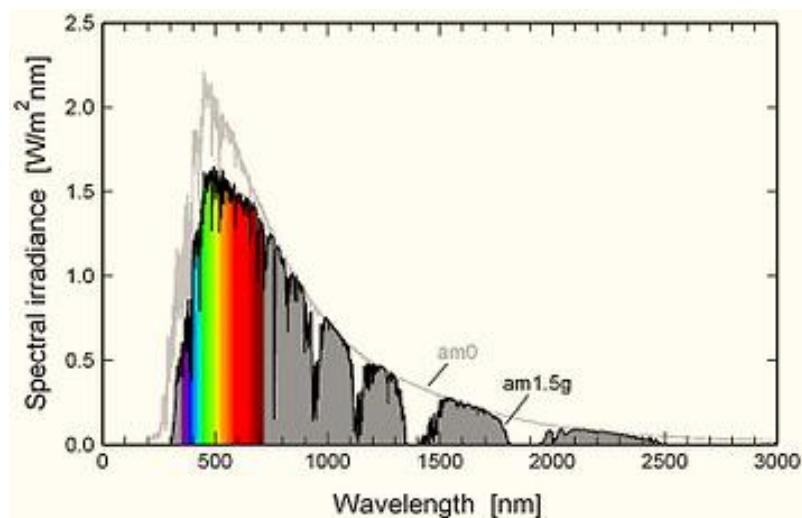


Ilustración 4: Espectro de irradiancia solar

El rango del espectro solar varía desde una longitud de onda igual a 300 nm hasta los 2500 nm. Al ser un rango tan amplio se divide en distintas regiones; el interés de nuestro estudio va a centrarse entre 500 y 600 nm, puesto que entre esas longitudes de onda ocurre el pico más alto. Por consiguiente, es importante el uso de materiales que tengan la banda de energía dentro de ese rango; de esta forma se conseguiría incrementar la eficiencia energética de la célula solar.

1.2.- Clasificación de células solares. Tres generaciones de dispositivos

Las células solares se clasifican en tres grandes grupos dependiendo de la naturaleza y las características de los materiales utilizados. Actualmente, se investiga activamente sobre las tres generaciones [6]. A lo largo de este punto se describen de forma más detallada.

1.2.1- Primera generación

Las células de la primera generación son las basadas en oblea. Destacan las de silicio cristalino, ya que son las que dominan el mercado ocupando alrededor del 90% de cuota. Son dispositivos de una gran superficie, alta calidad y resultan fáciles de fabricar. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes que presenta esta tecnología es que los costes de producción son elevados, y reducirlos resulta ser una tarea complicada, ya que requiere un elevado consumo de material y energía [7].

Por otro lado, la mayor ventaja de estos dispositivos es su elevada eficiencia, próxima al límite de eficiencia teórico establecido por Shockley-Queisser. La eficiencia de las células de esta generación se encuentra en torno al 26.7% las basadas en silicio monocristalino, y alrededor del 21.9% las basadas en obleas de silicio multicristalino. Las primeras presentan un color azulado uniforme en toda su área (ver Ilustración 5a), y se caracterizan por ser un único cristal con una única orientación; mientras que las segundas (ver Ilustración 5b) se caracterizan porque se aprecian diferentes tonalidades de azul debido a los diferentes granos formados y sus múltiples orientaciones.

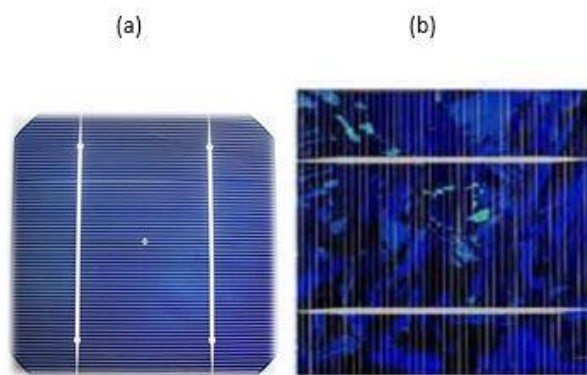


Ilustración 5: Células basadas en silicio (a) monocristalino y (b) multicristalino

Las estrategias tecnológicas que se están llevando a cabo en la industria para incrementar la eficiencia de los dispositivos de primera generación basados en silicio están focalizados en reducir las recombinaciones de portadores en la célula, reducir el espesor de la materia prima, introducir nuevas técnicas de procesamiento más económicas y, en particular, mejorar y diseñar nuevas estrategias para el atrapamiento de luz más eficiente dentro del dispositivo. En este punto en concreto se centra este trabajo: en desarrollar nuevas estrategias para el aumento de eficiencia de estas células, focalizando el esfuerzo en mejorar ópticamente la parte frontal del dispositivo.

Dado que este proyecto está centrado en la tecnología de células solares basadas en silicio, a continuación se presenta la estructura, así como los pasos de fabricación de este tipo de dispositivos. Finalmente, se hará una breve descripción de cuál es la tecnología más rentable dentro de este grupo.

1.2.1.1- Estructura y fabricación de una célula solar basada en silicio

Las células de primera generación basadas en silicio están constituidas por una oblea de silicio cristalino (c-Si) que actúa de capa absorbente. La oblea de silicio absorbe la luz solar y gracias al efecto fotovoltaico, los fotones absorbidos que tienen una energía superior

al band gap del material producen pares electrón-hueco, tal y como se muestra en la Ilustración 6 . Normalmente este silicio es de tipo p, y sobre esta oblea se forma un emisor mediante un proceso de difusión, que consiste en dopar el silicio con fósforo para constituir la capa de tipo n, y por lo tanto, la unión p-n. El campo eléctrico que conforma la unión p-n, se encarga de separar los portadores dando lugar a una corriente que se debe extraer desde la célula hacia un circuito externo, para ello se crean unos contactos óhmicos en ambas caras [7].

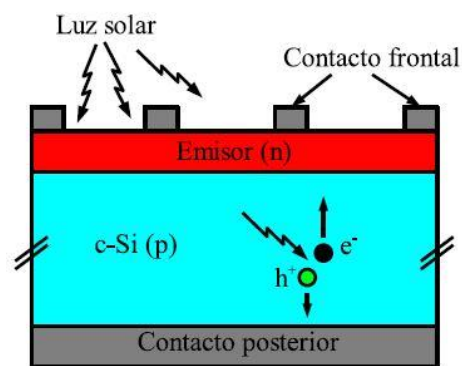


Ilustración 6: Estructura de una célula solar

Estas células están basadas en silicio, el segundo compuesto más abundante en la corteza terrestre, por detrás del oxígeno. En la Ilustración 7 se muestra un diagrama con la secuencia de pasos llevada a cabo para la formación de una célula solar y su integración en un módulo.

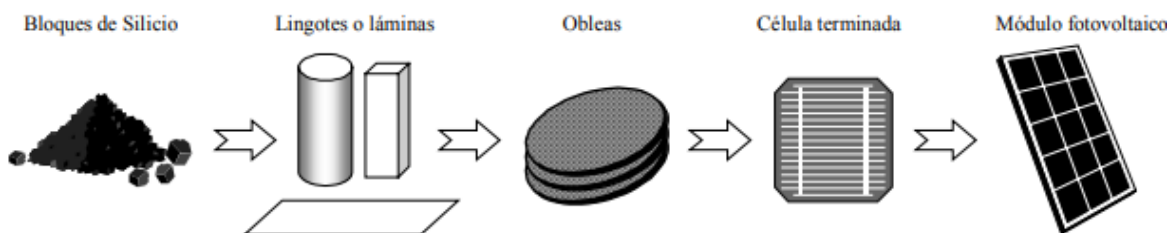


Ilustración 7: Diagrama con la secuencia de fabricación de un módulo fotovoltaico

A continuación se enumeran los pasos a seguir en la fabricación a nivel industrial de una célula solar basada en silicio:

Paso 1: Fabricación de la oblea de silicio cristalino

Se lleva a cabo la transformación del silicio a silicio metalúrgico de pureza 99% haciendo uso de un horno de arco para reducir las impurezas que contiene el material. Mediante una serie de procesos químicos tiene lugar la ultrapurificación y, finalmente, el material se solidifica dando lugar al polisilicio con una pureza del 99.99999%.

Sin embargo, aunque el polisilicio tenga una pureza adecuada, se necesita una estructura cristalina apropiada. Las técnicas que consiguen la cristalización del silicio de calidad fotovoltaica son el método Czochralski, el de la zona flotante y la solidificación direccional, mediante los cuales se produce silicio monocristalino. Cabe destacar que el método de zona flotante se obtiene un silicio de mayor calidad que con el método Czochralski, puesto que la concentración de impurezas es mucho menos. A continuación, se procede a explicar los tres métodos más utilizados en la actualidad.

La técnica más utilizada actualmente es el **método Czochralski**, el cual consigue producir silicio monocristalino con calidad suficiente para aplicaciones de la industria fotovoltaica. El procedimiento comienza fundiendo el silicio de grado microelectrónico en un crisol de cuarzo que se encuentra colocado dentro de un suscepto de grafito. A continuación, se utiliza una semilla de silicio monocristalino en forma de varilla, que se pone en contacto con el polisilicio fundido haciéndole rotar lentamente durante varias horas. Así, se consigue que los átomos del semiconductor fundido se agreguen a la semilla formando un cristal con forma de lingote cilíndrico denominado cuello. La temperatura y la velocidad de la varilla se irán reajustando para proporcionar al lingote el diámetro deseado.



Ilustración 8: Lingote de Si monocristalino realizado por el método Czochralski

El método de la **zona flotante** consiste en una columna de silicio en posición vertical dentro de una cámara con atmósfera inerte sujeta en sus dos extremos por dos soportes. Una zona de la columna se encuentra en contacto con una bobina por la que circula corriente de radiofrecuencia y mantiene fundida esa sección de la barra. La zona fundida se desplaza a lo largo de todo el semiconductor. En el extremo inferior hay una semilla de silicio monocristalino que ayuda a la cristalización del material y sirve de modelo de crecimiento. Cuando la zona flotante se desplaza hacia el extremo superior de la barra, el silicio monocristalino se recrystaliza en el extremo inferior y crece una extensión de la semilla. En consecuencia, la zona fundida queda flotante entre las dos zonas sólidas. Los lingotes obtenidos son más puros que los normalmente crecidos por el método anterior [8].

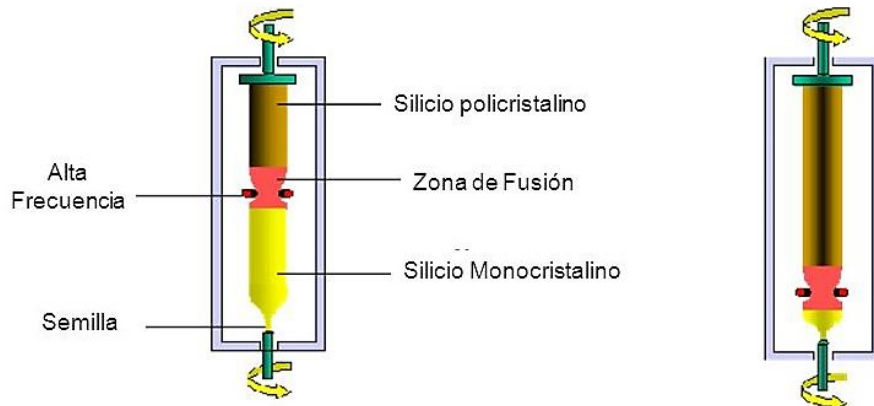


Ilustración 9: Método de la zona flotante

En el caso de la **solidificación direccional**, se introduce el polisilicio en un crisol dentro del horno de cristalización y se espera a que se funda. La cristalización está formada por la fase de fundición del silicio y, a continuación, el enfriamiento del mismo, de forma muy controlada. El proceso completo tiene una duración aproximada de 60 horas. Una vez obtenida la cristalización, se elimina el crisol y se prescinde de la cara superior y de los bordes del bloque, ya que es donde se concentran todas las impurezas y se presentan altas concentraciones de oxígeno. Asimismo, el material sobrante puede volver a utilizarse en los procesos de purificación y cristalización que le siguen.

Con estos tres métodos es habitual introducir una pequeña cantidad del dopante en el polisilicio, generalmente boro, de forma que al cristalizar se obtiene silicio tipo p que es el que forma la base (absorbente) de las células solares.

La gran ventaja que convierte al método Czochralski en la técnica más usada es el tiempo que se tarda en realizar el proceso completo, ya que la técnica de solidificación direccional consta de un ciclo bastante largo. Sin embargo, la solidificación direccional consume menos energía y, por lo tanto, es más económico [9].

Una vez obtenidos los lingotes, se procede a cortar las obleas usando una sierra multihilo que se encuentra impregnada de material abrasivo; en este proceso se pierde alrededor del 50% del material [1].

Paso 2: Limpieza, texturado, difusión del emisor y aislamiento de bordes

Al realizar los cortes de las obleas, se producen daños en la superficie debido a la acción de la sierra. Por este motivo, resulta necesario limpiar las obleas para eliminar la contaminación de la superficie y 10 μm de silicio dañado.

A posteriori, las obleas se texturizan introduciéndolas en una solución de sosa (NaOH); así, se crea una capa en la superficie de las obleas que tiene como finalidad

incrementar la cantidad de luz captada por el dispositivo. La reflectancia de la oblea en este proceso se puede reducir hasta un 30%.

A continuación, se lleva a cabo la creación de la unión p-n mediante la difusión de un emisor de fósforo en la superficie de la célula. Las obleas se colocan en un horno de tubo para difundir una pequeña cantidad de fósforo en su superficie. Este proceso puede durar aproximadamente una hora y se alcanzan temperaturas superiores a los 900°C.

Mientras las obleas se encuentran dentro del horno de tubo, es muy importante aislar la parte frontal de la posterior para que no se produzca un cortocircuito en la célula. Este paso es conocido como aislamiento de bordes. Una forma común de aplicar esto esta técnica es mediante un láser; aunque también se pueden apilar las obleas y atacarlas con un plasma y grabar las obleas [1].

Paso 3: Capa anti-reflectante, pasivante y serigrafía

El paso que viene a continuación es la aplicación de la capa anti-reflectante de nitruro de silicio (SiNx) con el fin de disminuir la reflectancia de la célula aún más, si cabe, llegando al 3% después del texturado. Para lograrlo se ajusta el índice de refracción y el espesor de la capa para que el acoplamiento óptico entre el silicio y el SiNx sea el mejor posible. Esta capa también actúa como pasivante de la parte frontal de la célula. Acto seguido, se pasiva la superficie posterior. La pasivación permite la reducción de recombinación de los portadores fotogenerados tras la iluminación, efecto que debe minimizarse puesto que se trata de un factor limitante en el rendimiento del dispositivo. En concreto, la recombinación superficial, ya que en el caso del silicio de alta calidad los efectos de recombinación en volumen son casi despreciables.

Por último, se aplican los contactos metálicos mediante la técnica conocida como serigrafía. Consiste en pintar los dispositivos con una pasta metálica realizando un diseño previamente elegido (Ilustración 10).

Tras haber pintado la célula, se deja secando y recociendo a altas temperaturas. Gracias a las condiciones de recocido, el contacto eléctrico entre el emisor y la cara frontal, y entre la base y la cara posterior de la célula se realizan de forma correcta.

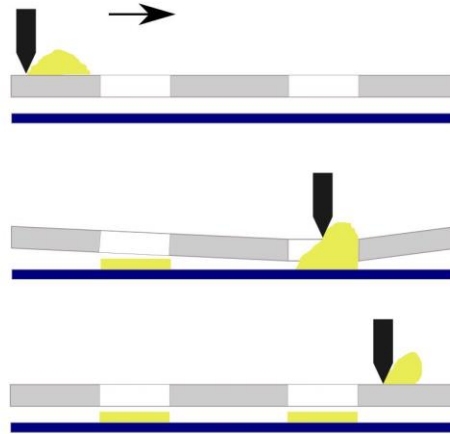


Ilustración 10: Funcionamiento de la serigrafía de células solares

La parte frontal de la célula se serigrafía utilizando una malla de metalización en forma de peine. Esto da lugar a unas líneas finas y paralelas llamadas dedos y dos o más líneas gruesas conocidas como buses que cortan en perpendicular a los dedos. El diseño descrito resulta clave a la hora de lograr la eficiencia deseada (Ilustración 10).

Por otro lado, en la cara posterior se usa una capa continua de pasta metalizada de aluminio que se difunde hacia el silicio. Una vez recocida la capa, se aplican unos buses de plata para que sea posible soldar las células una vez acabado el proceso por completo [1].

1.2.2.- Segunda generación

El interés que presenta esta segunda generación de células reside en el ahorro de material, puesto que son células basadas en lámina delgada, y esto deriva en una disminución significativa de los costes de producción. Además, las técnicas de fabricación

que se emplean permiten el uso de bajas temperaturas, lo que supone un importante ahorro energético. La principal desventaja que presentan es que sus eficiencias de conversión son inferiores a las células de primera generación. Permiten el uso de substratos baratos y flexibles, se reduce el tiempo de fabricación puesto que se usa la interconexión monolítica, y son altamente reproducibles.

La capa absorbente es la que da el nombre a la célula. Así que, dentro de este grupo se encuentran las basadas en silicio amorfo y sus aleaciones con hidrógeno, las basadas en telurio de cadmio (CdTe) y las basadas en aleaciones de cobre, indio, galio y selenio (CIGS). Estas últimas son las que mayor eficiencia tienen a día de hoy, alrededor de un 22.6%. Mientras que son las de CdTe las líderes en el mercado en términos de potencia instalada, alcanzando una cuota del 3.1% del mercado.

Las técnicas de fabricación de este tipo de células suponen métodos simples y de fácil adaptación. Además, consiguen reducir la temperatura del proceso de forma significativa.

1.2.2.1.- Estructura y fabricación de células de lámina delgada

A diferencia de las células de silicio cristalino, en el proceso de producción de este tipo de células se emplean técnicas de depósito en las que se pueden reducir las temperaturas de fabricación hasta llegar incluso a temperatura ambiente, pudiéndose permitir técnicas de producción en masa, como el roll-to-roll. Sobre el substrato de bajo coste (lámina de vidrio, metal o plástico), se deposita directamente el semiconductor que va a actuar de contacto frontal. Este semiconductor suele ser un óxido conductor transparente (OCT) que presenta una buena conductividad térmica y transparencia en el rango de luz visible. Los materiales más utilizados en esta fase del proceso son el Zn, SnO_2 y $In_2O_3:Sn$ (ITO). Asimismo, el OCT ha de ser químicamente estable para poder

soportar la temperatura del sustrato durante todo el proceso de fabricación, así como la temperatura de funcionamiento del dispositivo en condiciones reales.

La técnica más habitual para depositar el contacto frontal es la pulverización catódica por magnetrón (*sputtering*), que es un proceso físico en el que los átomos de un material sólido, denominado “blanco”, se vaporizan tras ser bombardeados por iones muy energéticos. Los iones se generan en un plasma tras la aplicación de un voltaje (mediante una corriente alterna de radiofrecuencia o corriente continua) y el suministro de gas Argón en la cámara de proceso. Los átomos de material arrancados tienden a condensarse de vuelta a su estado sólido sobre el sustrato [1].

En segundo lugar se procede al depósito de las capas semiconductoras: capa ventana y absorbente. La capa denominada ventana es la primera que recibe los fotones. Para que llegue una cantidad de luz elevada a la zona donde tiene lugar la unión, la ventana debe poseer una energía de gap elevada y ser muy fina.

En cuanto al material absorbente, se va a considerar el material semiconductor principal del dispositivo. Los semiconductores más utilizados para esta capa son el silicio amorfo hidrogenado, el CdTe y el CIGS.

Las capas semiconductoras se van a depositar, en su mayoría, utilizando la técnica conocida como deposición química en fase vapor asistido por plasma (PECVD). Se trata de un proceso químico que se emplea para fabricar capas de alta pureza. Consiste en un reactor donde el sustrato se expone a uno o más precursores volátiles, que reaccionan o se descomponen en la superficie del sustrato para producir el depósito deseado. Mediante el control de los distintos parámetros del reactor, se van depositando diferentes capas con la composición, dopado y grosor que se desee y, así, crear múltiples tipos de configuración de células con una o varias uniones. También existen otras técnicas de deposición como el depósito por transporte de vapor, el depósito electro-químico o el baño químico.

En tercer lugar, es habitual añadir una capa adicional para que actúe como reflector. De esta forma, la radiación que no consigue ser absorbida puede ser devuelta al semiconductor para lograr incrementar la eficiencia del dispositivo. A continuación, se realiza el depósito del contacto posterior introduciendo una capa metálica que consiga un buen contacto óhmico con el semiconductor, de tal forma que el reflector está compuesto por OCT/metal. La técnica más usada en esta última fase es la evaporación térmica [1].

Por último, dependiendo de por dónde entre la luz al dispositivo, se va a tener una configuración en sustrato o en superestrato. Este aspecto resulta importante, ya que la eficiencia del dispositivo va a depender de la configuración que se use.

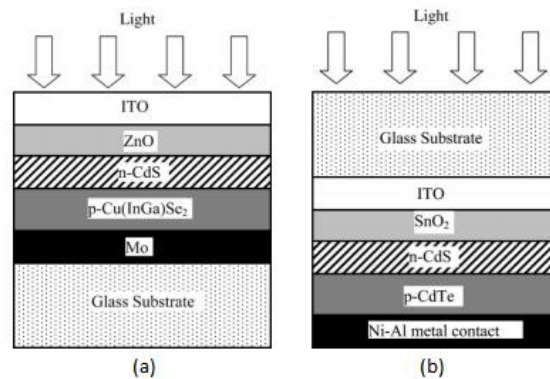


Ilustración 11: Estructuras de células de lámina delgada con (a) configuración de sustrato y (b) configuración de superestrato

Con una configuración en sustrato, las capas que forman la estructura de la célula se depositan sobre un sustrato transparente u opaco mientras la luz incide por la cara sobre la que están depositadas las láminas; en la configuración en superestrato, la luz incide directamente a través del sustrato utilizado, lo que requiere que este sea transparente a la radiación [9].

1.2.3.- Tercera generación

La tercera generación de células aprovecha las novedades introducidas por la generación anterior y va a tener como finalidad continuar con la disminución del coste de producción si perder prestaciones.

Estas células se encuentran todavía en fase de desarrollo. Actualmente, la investigación se dirige a lograr eficiencias de conversión entre el 30% y el 60%. Existen diversos diseños de dispositivo con los que se podrían superar los límites teóricos de rendimiento; entre ellos, se encuentran los dispositivos tándem, que combinan dos o más células de materiales distintos, donde cada una aprovecha un rango específico del espectro solar; también la concentración solar, donde la célula solar incorpora dispositivos ópticos que permiten concentrar la luz solar haciendo que el tamaño de la célula se reduzca, y por lo tanto, se reduzca el coste de la energía generada gracias al uso de un sistema de lentes y tecnología óptica más accesible.

Sin embargo, esta generación de células está en vía de desarrollo. Aún queda mucho por hacer para que esta tecnología llegue a mercado, como es asegurar la estabilidad y durabilidad de estos dispositivos, y su escalado a grandes áreas.

1.3.- Materiales usados en la fabricación de células solares

En este apartado se van a tratar las propiedades de los materiales empleados en la fabricación de células solares fotovoltaicas, los semiconductores. Los materiales semiconductores se pueden comportar de dos formas; como un conductor, o como un aislante. Estos dos comportamientos van a depender del campo magnético y eléctrico al que esté sometido el material, la radiación solar que incida en la célula y la temperatura del ambiente en el que se encuentre [10].

1.3.1.- Materiales semiconductores

Un material semiconductor es aquel que tiene una conductividad eléctrica intermedia, entre la de los metales y los aislantes [11]. Los materiales semiconductores provienen de diferentes grupos de la tabla periódica, pero comparten ciertas similitudes. Teniendo esto en cuenta, los átomos en un semiconductor pueden ser materiales del grupo IV de la tabla periódica, o de una combinación de grupo III y de grupo V (llamados semiconductores III-V), o de combinaciones de grupo II y del grupo VI (llamado semiconductores II -VI). Debido a que diferentes semiconductores se componen de elementos de distintos grupos de la tabla periódica, sus propiedades varían [5].

En la Ilustración 12 se muestran en color azul los materiales semiconductores más comunes que constituyen la materia prima principal para fabricar dispositivos como detectores, transistores, microprocesadores y dispositivos fotovoltaicos. Un semiconductor puede tratarse de un solo elemento de la tabla periódica, como ocurre con el silicio (Si), o de una combinación de ellos, como puede ser el caso del GaAs o CdTe (telururo de cadmio) [11].

								VIIIA			
								2	He 4.003		
		IIIA		IVA		VA		VIA		VIIA	
		5	B 10.811	6	C 12.011	7	N 14.007	8	O 15.999	9	F 18.998
		13	Al 26.982	14	Si 28.086	15	P 30.974	16	S 32.064	17	Cl 35.453
IB	IIB	29	Cu 63.54	30	Zn 65.37	31	Ga 69.72	32	Ge 72.59	33	As 74.922
		34	Se 78.96	35	Br 79.909	36	Kr 83.80				
		47	Ag 107.870	48	Cd 112.40	49	In 114.82	50	Sn 118.69	51	Sb 121.75
		52	Te 127.60	53	I 126.904	54	Xe 131.30				
		79	Au 196.967	80	Hg 200.59	81	Tl 204.37	82	Pb 207.19	83	Bi 208.980
								84	Po (210)	85	At (210)
										86	Rn (222)

Ilustración 12: Sección de la tabla periódica

La conducción en los semiconductores requiere energía térmica, lo que ocurre de manera óptima en un rango de temperatura situado alrededor de la temperatura ambiente en los semiconductores más empleados. En estas condiciones es cuando los electrones poseen energía suficiente para escapar de sus enlaces, quedando libres de moverse por toda la red cristalina y formando parte en la conducción. Por el contrario, a temperaturas cerca del cero absoluto, el material semiconductor se comportaría como un aislante.

Considerando que existen unos límites de energía con los que un electrón pasa, o no, a ser libre, se podría hablar de dos niveles de energía. Cuando un electrón pasa a ser libre, se considera en un estado de “alta energía”; a esta energía se le denomina banda de conducción (E_c). Por otro lado, bajo la situación de que todos los electrones se encuentren enlazados y no participen en la conducción, el estado en el que se encuentran es “baja energía” y se denomina banda de valencia (E_v).

El electrón no podrá alcanzar valores de energía intermedios a estos dos niveles; el intervalo de energía que se encuentra entre E_c y E_v se denomina banda prohibida. A la cantidad mínima de energía requerida para que un electrón se libere de su enlace se le conoce como “band gap” o “energía de gap” del semiconductor. Esta energía va a determinar la energía que deben tener los fotones que inciden en la célula solar para permitir la conducción, así como la cantidad de energía que se genera.

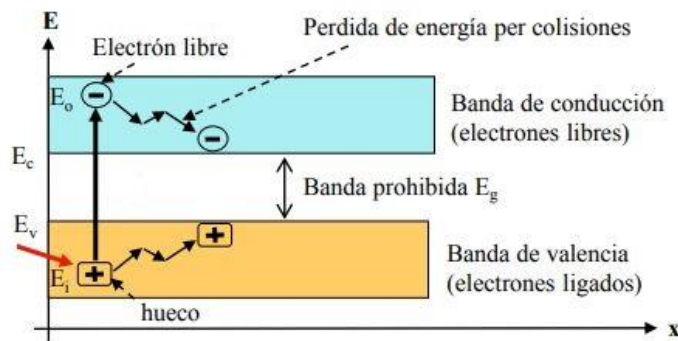


Ilustración 13: Diagrama de bandas

Cuando el electrón rompe el enlace y pasa a la banda de conducción, se deja un estado libre en la banda de valencia denominado hueco, que será similar a un electrón pero con carga positiva y también formará parte en la conducción. Por lo tanto, los parámetros de interés de un material semiconductor para el correcto funcionamiento de una célula solar son:

- Energía de gap (E_g).
- El número de cargas libres (electrones o huecos) disponibles para la conducción.
- La generación de cargas libres (electrones o huecos) en respuesta a la luz que incide en el material (absorción).

En cuanto a la clasificación de los semiconductores, existen dos tipos en función de su pureza, intrínsecos y extrínsecos. Se conoce como semiconductor intrínseco al que no posee ninguna impureza ni átomos de otro tipo dentro de su estructura, es decir, que se encuentra en estado puro. El silicio (Si) y el germanio (Ge) poseen cuatro electrones en su última órbita, por lo que poseen un equilibrio eléctrico que les proporciona una estructura molecular pura. El número de huecos que dejan los electrones al abandonar la banda de valencia es igual al número de electrones libres que se encuentran en la banda de conducción.

Cuando se introducen dopantes o impurezas en un semiconductor intrínseco se forma un semiconductor extrínseco; esta técnica tiene como finalidad cambiar las propiedades eléctricas del material. La conductividad de estos materiales dependerá de la concentración de los átomos dopantes. Normalmente, los átomos que se utilizan para dopar al material en estado puro corresponden también a elementos que poseen tres o cinco electrones en su última órbita. Asimismo, dependiendo de las impurezas que se agreguen se clasifican dos tipos de materiales semiconductores extrínsecos: tipo n y tipo p. El material se considerará de tipo n cuando se aumente la cantidad de electrones libres y,

de tipo p cuando se aumenta el número de huecos. En ambos casos se consigue que el nivel de conductividad del semiconductor sea mayor [11].

En un semiconductor extrínseco, en el que la impureza esté activa, habrá una mayor concentración de electrones libres que de huecos y viceversa, por lo que al tipo de portador con mayor concentración se denominará "portador mayoritario", mientras que el de menor concentración se llamará "portador minoritario". La siguiente tabla (Tabla 1) recoge el portador que se genera cuando se dopa el silicio con los dopantes habituales, el fósforo y el boro [5].

	Tipo n	Tipo p
Dopante	Grupo V (Fósforo)	Grupo III (Boro)
Portador mayoritario	Electrones	Huecos
Portador minoritario	Huecos	Electrones

Tabla 1: Propiedades de los tipos n y p

La gran diferencia de las concentraciones de portadores entre el semiconductor tipo p y el tipo n promueve la difusión de los portadores mayoritarios de uno a otro. Si se unen dos semiconductores, uno tipo p y otro n, se genera una unión p-n, y en la interfaz entre el ambos aparece un campo eléctrico interno. En el campo eléctrico, los portadores que tienen las cargas opuestas se desvían hacia direcciones opuestas. Por ejemplo, los electrones, que son el portador minoritario en el material de tipo p, se aceleran hacia el material de tipo n bajo la influencia del campo eléctrico interno. Mientras tanto, los huecos que son portadores mayoritarios son rechazados por el campo eléctrico. De esta manera, el par electrón-hueco está separado [3].

Bajo iluminación, se generan pares adicionales de electrón-hueco y la concentración de portadores minoritarios en cada capa (electrones en tipo p y huecos en tipo n) aumenta significativamente. Las crecientes concentraciones de portadores hacen que los electrones

en la capa de tipo p fluyan hacia la capa de tipo n, y los huecos desde el tipo n hacia la capa de tipo p. El flujo de portadores fotogenerados se denomina corriente fotogenerada [3].

1.3.1.2.- Silicio y sus propiedades

El uso de Si en las células solares se beneficia del nivel de desarrollo y maduración en el que se encuentra la industria de fabricación de productos electrónicos, y su uso resulta muy adecuado para dispositivos de grandes superficies debido a la relativa abundancia del material [2]. Esto hace que el silicio sea el semiconductor más utilizado en aplicaciones fotovoltaicas. Como se puede observar en la Ilustración 14, el silicio posee cuatro electrones en la banda de valencia. Cada línea que conecta los átomos representa un electrón compartido entre los dos, por lo que cada átomo está rodeado por ocho electrones. Por último, dos electrones compartidos son los que forman el enlace covalente [5].

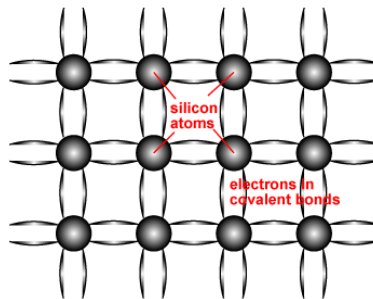


Ilustración 14: Estructura de un semiconductor

Es posible cambiar el equilibrio de electrones y huecos intencionadamente en una red cristalina de silicio dopando al semiconductor. Los átomos que tienen un electrón de valencia mayor que la del silicio se utilizan para generar semiconductores de tipo n. Como el silicio tiene valencia 4, los elementos a utilizar poseerán valencia 5. Estos materiales permiten la aparición de electrones libres sin tener previamente huecos libres asociados a ellos, ya que existe un electrón no ligado que necesitará menos energía para separarlo y que pase a ser libre para participar en la conducción. A los átomos de este tipo se les conoce como “donantes”.

Por el contrario, los átomos con una valencia menor a la del silicio constituirán los semiconductores tipo p. Este material de tipo p tendrá solo 3 electrones de valencia con los que interactuar con los átomos de silicio. Como no hay suficientes electrones para formar los 4 enlaces covalentes, el resultado es un hueco. El número de electrones atrapados en los enlaces es mayor, lo que aumenta el número de huecos. A los átomos de este tipo se les conoce como “aceptores”.

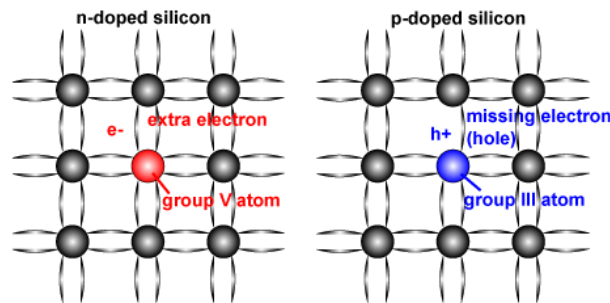


Ilustración 15: Esquema de una red cristalina de silicio dopado con impurezas

A continuación (Ilustración 16), se muestra el proceso que sucede al unir el material semiconductor de tipo n con el de tipo p.

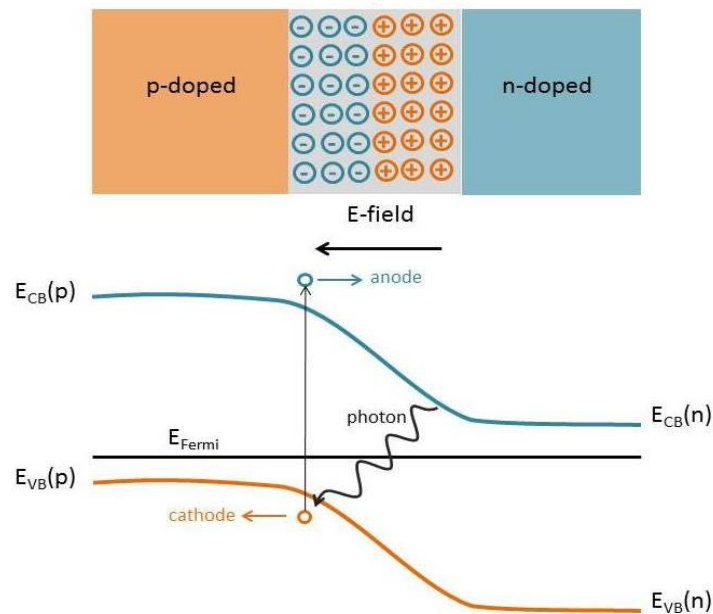


Ilustración 16: Unión p-n

Una vez que se ha creado la unión p-n, es decir, se han puesto en contacto dos semiconductores p y n, los electrones libres de la zona n se difunden hacia la zona p donde hay menos electrones. Esto origina una carga desigual a los dos lados de la unión, dando lugar a un campo con un potencial de contacto que polariza la zona de unión e impide que prosiga la difusión. Cuando se genera un par electrón-hueco debido a la iluminación, el campo eléctrico distribuye las cargas del electrón y del hueco y se crea una diferencia de potencial entre las capas de la célula. Este voltaje conduce una corriente eléctrica por la carga.

1.3.2.- Conceptos de homounión y heterounión en células solares

Las células solares se pueden clasificar también según el tipo de materiales que componen la unión p-n. Por tanto, se encuentran las células de homounión, que son básicamente las células de silicio convencionales de primera generación, descritas en el apartado 1.2.1 de esta memoria. En este caso, la unión p-n que conforman estos dispositivos está compuesta por un solo material dopado con distintas impurezas. Gracias a este dopaje con distintos elementos se consigue material tipo p y tipo n, que juntos conformarán la unión. El proceso de dopado del material que funciona como absorbente se realiza durante el proceso de crecimiento de los lingotes. Por otra parte, el dopado del material que tiene el papel de emisor se lleva a cabo mediante difusión del dopante correspondiente en procesos a alta temperatura.

La primera célula solar basada en este concepto de homounión fue fabricada en los laboratorios Bell por Pearson et al. en 1954 y consistía en una homounión de silicio monocristalino (c-Si). A partir de 1970, los dispositivos fotovoltaicos se empezaron a considerar para aplicaciones terrestres, lo que dio lugar al desarrollo de multitud de conceptos de células, teniendo como objetivo el reducir los costes y amentar la eficiencia [12].

Por otra parte, las células de heterounión están constituidas por dos materiales tipo p y tipo n químicamente distintos. Teniendo esto en cuenta, el valor de la energía de gap de los materiales no va a ser la misma, formándose así discontinuidades en la estructura de bandas. Además, para la fabricación de los distintos materiales que conformen la unión, se emplean procesos de depósito por métodos químicos y/o físicos en lugar de recurrir a procesos de difusión.

En 1983 se fabricó la primera estructura de heterounión y fue introducida por Hamakawa. Esta tecnología ha atraído mucha atención y ha alentado a grupos de investigación a estudiar y desarrollar estructuras novedosas y muy eficientes, como las HIT de Sanyo introducidas en 1991 basadas en tecnología de silicio, donde se intercalan una capa delgada intrínseca de a-Si:H entre la oblea de c-Si y la capa dopada de a-Si:H.

Las células de heterounión de silicio (SHJ, silicon hetero-junction) son un híbrido entre las células de homounión y las de lámina delgada. El absorbente, de tipo p o n, es una oblea de c-Si como en los dispositivos de primera generación. Sin embargo, el emisor se obtiene mediante el depósito de una lámina de silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H). Ambos materiales difieren en su estructura molecular y tienen un gap diferente. La inserción de a-Si:H intrínseco en la interfaz entre el tipo p (a-Si:H) y el tipo n (c-Si) ha sido un desarrollo notable y se emplea para pasivar posibles enlaces en la superficie de c-Si, reduciendo, así, las pérdidas por recombinación.

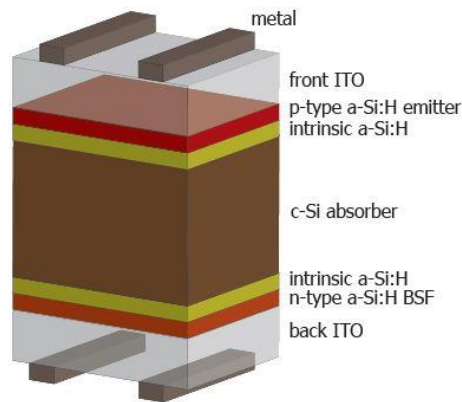


Ilustración 17: Célula solar de silicio de heterounión (SHJ)

Las células SHJ son una alternativa a las células de unión única convencionales, debido a la sencillez del proceso de fabricación, permite además reducir los costes de producción, hace que se ahorre energía ya que se emplean bajas temperaturas de fabricación y, además, con esta tecnología existe la posibilidad de utilizar substratos más delgados y, por tanto, más baratos. En consecuencia, la célula solar de heterounión de silicio resulta ser un candidato muy prometedor para alcanzar elevadas eficiencia dentro de la tecnología del silicio cristalino [12].

1.4.- Caracterización de las células solares

Una célula solar ideal se representa mediante una fuente de corriente conectada en paralelo con un diodo rectificador, quedando un circuito equivalente como el representado en la Ilustración 18.

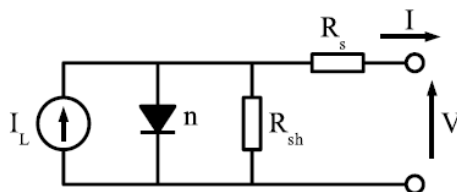


Ilustración 18: Circuito equivalente de una célula solar fotovoltaica [7]

La curva IV de una célula solar es la superposición de la curva IV del diodo de la célula en la oscuridad con la corriente generada por la luz. La luz tiene el efecto de desplazar la curva IV hacia abajo, al cuarto cuadrante, donde se puede extraer energía del diodo (Ilustración 19).

La curva IV correspondiente de la célula se va a describir mediante la ecuación de Shockley [5]:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right]$$

Ecuación 1: Ecuación de Shockley

donde I_L , denominada fotocorriente, es la corriente generada cuando incide la radiación solar en la célula, k es la constante de Boltzmann, T equivale a la temperatura y q a la carga del electrón. Por último, V es la tensión en los terminales de la célula e I_0 es conocida como la corriente de saturación inversa del diodo, que es la corriente que se fija en el diodo cuando se polariza en inversa en oscuridad.

El máximo valor de corriente que puede circular por el dispositivo como generador se alcanza cuando el voltaje que atraviesa el dispositivo es cero; es decir, cuando la célula solar se encuentra cortocircuitada externamente. Esta corriente es conocida como I_{sc} (corriente de cortocircuito). Cuando se habla de una célula solar ideal, la corriente de cortocircuito es igual que la corriente generada por la luz (I_L). Esta corriente va a depender de una serie de factores que se listan a continuación:

- El área de la célula solar: para eliminar la dependencia que existe con el área de la célula solar, es más común utilizar la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc} , en mA/cm^2) en lugar de la corriente de cortocircuito.
- El número de fotones que inciden en el dispositivo.
- El espectro de la luz incidente, se encuentra estandarizado para el espectro AM1.5G en su mayoría.

- Propiedades ópticas de las capas que forman la célula solar: absorción y reflexión.
- La probabilidad de recolección de la célula, que depende principalmente de la pasivación de la superficie, la existencia o no de elementos de concentración, y la vida útil del portador minoritario en la base.

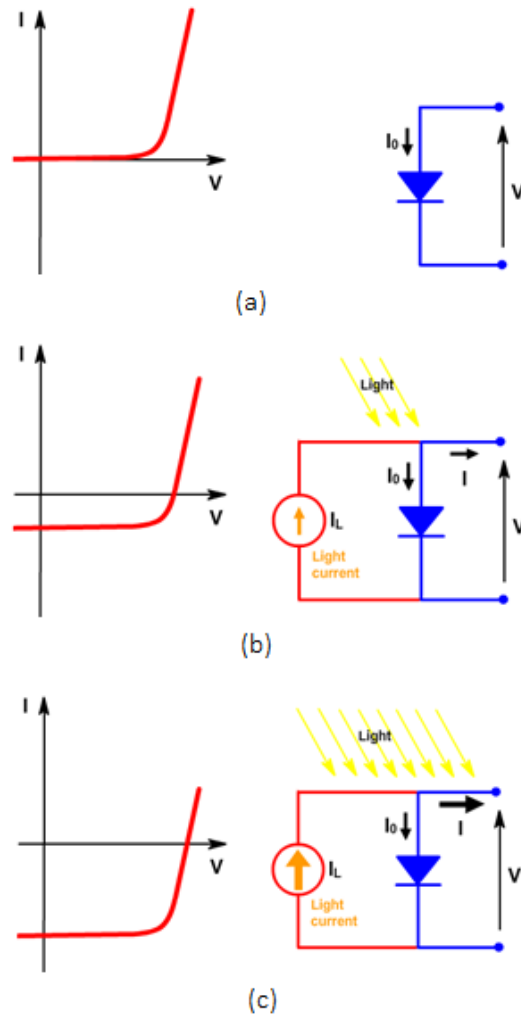


Ilustración 19: El efecto de la luz en la curva IV. (a) Si iluminación, una célula solar tiene las mismas características eléctricas que un diodo. (b) Bajo iluminación, la curva IV se desplaza a medida que la célula comienza a generar energía. (c) Cuanto mayor es la intensidad de la luz, mayor es el desplazamiento [5].

La I_{sc} máxima ideal se puede obtener suponiendo que todos los fotones que inciden en el dispositivo con energía superior a la energía de gap (E_g) son absorbidos, generando

cada uno de ellos un par electrón-hueco y suponiendo posible la extracción de todos los portadores generados [7] [5].

Sin embargo, puede ocurrir que los fotones que consiguen ser absorbidos no lleguen a la energía de gap o que la superen notablemente. Existen tres procesos distintos:

1. Cuando la energía del fotón es menor a la energía de gap de la célula, el fotón no intervendrá en la generación de corriente eléctrica y éste no es absorbido por el material.
2. Ambas energías, tanto E_g como E_{ph} son iguales o esta última es ligeramente superior, por lo que el fotón tiene la energía mínima para ser absorbido y genera un par electrón-hueco.
3. Si el fotón llega con una energía mucho mayor que la E_g , el electrón libre pasa a la banda de conducción con una diferencia de energía grande que se disipa en forma de calor.

Como se ha señalado varias veces a lo largo del proyecto, una parte muy importante del proceso de conversión de energía en las células solares es la cantidad de fotones que son absorbidos por la primera capa del dispositivo. El silicio refleja una importante cantidad de luz de la que le llega, por lo que para reducir el reflejo de la luz en la superficie del material se utiliza como estrategia una capa anti-reflectante (ARC), de forma que se obtenga una mejora óptica en la célula sin empeorar su comportamiento eléctrico [5].

El alto contraste entre índices de refracción del aire y del silicio es la principal causa de las pérdidas por reflexión en la superficie. Para conseguir reducir al máximo las pérdidas totales por reflexión dentro del rango de luz visible, se diseña una capa anti-reflectante que puede estar compuesta por uno o varios materiales, siendo el espesor y el índice de refracción de cada material los parámetros que definen esta estructura. A continuación, se describe de una forma más detallada el papel de la capa ARC y sus propiedades ópticas.

1.4.1.- El papel de la capa anti-reflectante: ARC

La capa anti-reflectante consiste en una capa de espesor especialmente elegido para que los efectos de interferencia en la superficie provoquen que la onda reflejada en el ARC quede desfasada con la onda reflejada en el material. Las ondas reflejadas que no estén en fase interferirán de forma destructiva entre sí, resultando así en una energía reflejada neta cero.

El espesor del revestimiento del material antirreflectante se elige de modo que la longitud de onda en el material sea un cuarto de la longitud de onda de la onda (λ) entrante y, por lo tanto la reflexión sea mínima a λ elegida (de diseño) [5]. Desde esta forma, se pueden realizar los diseños de los recubrimientos a una determinada λ dependiendo de dónde se quiera que la reflectancia sea mínima.

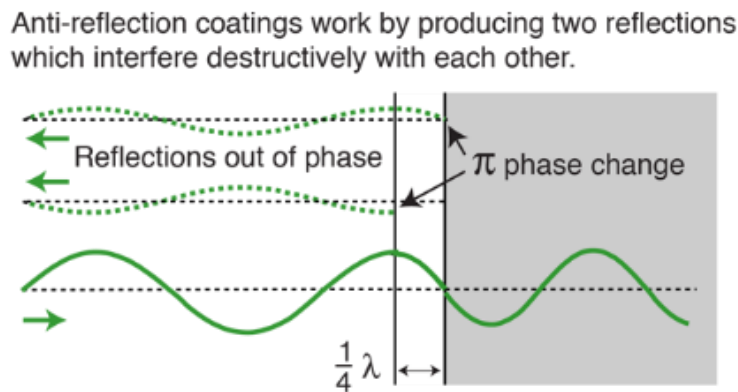


Ilustración 20: Comportamiento de la onda reflejada en el ARC

Para explicar con más detalle el papel del recubrimiento, a continuación se muestra los fenómenos que suceden al interaccionar la luz con un medio material. Cuando el rayo de luz alcanza una interfaz entre dos medios con diferentes índices de refracción pueden darse tres fenómenos. Si la onda que incide en la superficie choca, se desvía y retorna al medio del que venían ocurre el fenómeno de la reflexión. Por el contrario, los rayos pueden atravesar el primer medio y llegar hasta un segundo medio (fenómeno de transmisión). Por

último, si al pasar por un medio, una fracción de luz se absorbe, esto se conoce como el fenómeno de absorción. Estos tres fenómenos pueden ocurrir simultáneamente [5].

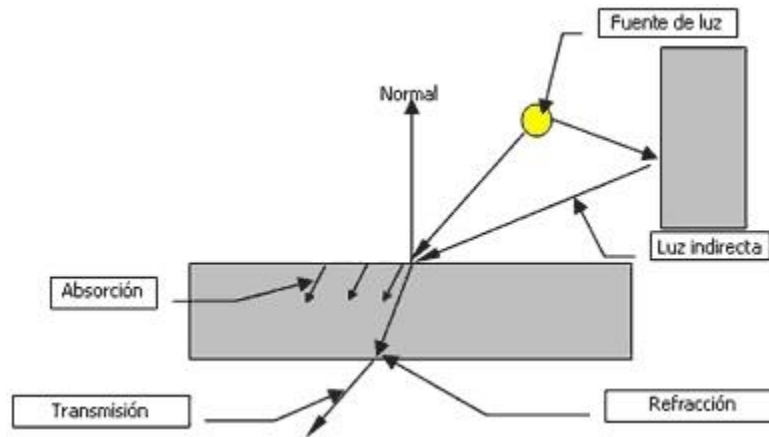


Ilustración 21: Diagrama sobre las leyes básicas de interacción radiación-materia

La interfaz óptica se caracteriza, por lo tanto, por el comportamiento de la luz asociada con los fenómenos de reflectancia, absorbancia y transmitancia. Como la energía no se destruye, la suma de energía transmitida, absorbida y reflejada tiene que ser igual al total de energía incidente.

Las propiedades ópticas de refracción de un material se pueden explicar definiendo su índice de refracción (n). Se define el índice de refracción como la relación existente entre la velocidad de la luz en el medio (v) y en el vacío (c), es decir $n = c/v$. Este parámetro óptico varía en función de la frecuencia de la luz, cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la longitud de onda: $f = c/\lambda$. Por otro lado, el efecto conocido como refracción se produce cuando una fracción de luz penetra en un medio cambiando la dirección de la onda debido al cambio de medio. La luz entrante de un medio con un índice de refracción n_1 podría llegar a una interfaz desde cualquier dirección y se refracta en cierta dirección según el índice de refracción del medio n_2 . El ángulo de incidencia se denomina θ_i y el ángulo de refracción se denota como θ_t [3].

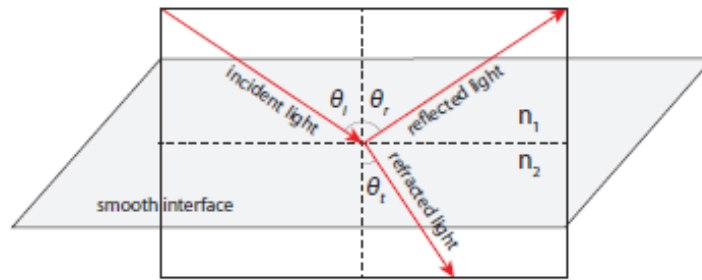


Ilustración 22: Reflexión y la refracción de la luz en una interfaz plana [3]

El fenómeno de absorción es conocido como la transformación de la energía radiante en otra forma de energía y se define el coeficiente de absorción (α) como la fracción de luz absorbida por el material. La intensidad de la luz (I) decrece en función de la distancia recorrida siguiendo la Ecuación 2.

$$I(z) = I_0 e^{(-\alpha x)}$$

Ecuación 2: Intensidad de la luz en función de la distancia

Se define I_0 como la intensidad inicial y α se expresa en cm^{-1} [13]. Este fenómeno lo poseen todas las superficies que no son completamente reflectoras y los materiales que no son del todo transparentes.

De acuerdo con la Teoría de Ondas Electromagnéticas, la cantidad de luz y la forma en la que se refleja la luz en una superficie plana viene determinada por las propiedades de reflexión que posea el material. La relación que existe entre la cantidad de luz reflejada y el haz de la luz incidente se denomina reflectancia. Cabría señalar que los conceptos de reflexión y transmisión se refieren al proceso físico, mientras que reflectancia y transmitancia son relaciones matemáticas.

En este trabajo, las medidas ópticas de las láminas de semiconductor fabricadas por pulverización catódica y que formarán parte de las capas ARC se han llevado a cabo en un Espectrofotómetro LAMBDA 1050 UV/Vis que se encuentra situado en los laboratorios del

CIEMAT. En concreto, se han realizado medidas de transmitancia y reflectancia especular, utilizando un accesorio específico para posicionar la muestra de tal manera que se esté asegurando que el haz de luz se introduce especularmente (incidiendo normal a la superficie) sobre la superficie de la muestra. Estas medidas se han empleado para determinar el índice de refracción de los materiales fabricados, y aproximarnos lo más posible a la realidad. En este caso particular, el haz incide sobre la muestra y el resultante de atravesarla (en transmisión) o de reflejarse (en reflexión) se recoge con un módulo de tres detectores que detectan la señal dependiendo del rango de longitudes de onda. En nuestro caso particular se tiene:

Tipo de detector	Rango de λ (nm)
PMT (fotomultiplicador)	hasta 860
InGaAs	860-1060
PbSe	1060-2500

Tabla 2: Rango de medidas para los resultados experimentales

Se analiza la cantidad de luz que atraviesa/refleja el sándwich muestra/substrato en condiciones de incidencia normal en comparación con el haz incidente. De estos cálculos se obtienen los espectros de transmitancia y reflectancia dependiendo de la longitud de onda de la luz incidente. Cabe destacar que todas estas medidas están hechas a temperatura ambiente y que para este análisis las láminas se han fabricado sobre sustrato transparente, como es un vidrio.

Por otro lado, también se han llevado a cabo medida de reflectancia total de los recubrimientos para las que se ha utilizado el módulo de esfera integradora. Este módulo tiene en su interior una esfera de 60 mm de diámetro donde se posiciona la muestra y se detecta la señal de luz con los mismos tres detectores descritos. Esta medida es de vital importancia para caracterizar el recubrimiento sobre el sustrato Silicio que es el que se va a emplear ya en el dispositivo. Y nos da una idea de la cantidad de luz que se puede reflejar

en todas las direcciones por el sándwich formado entre ARC/silicio. En las simulaciones de este trabajo se ha tenido en cuenta que el espectro de reflectancia total es muy similar al de reflectancia especular. Esta aproximación puede considerarse como válida puesto que las láminas depositadas sobre el sustrato son muy planas.

Para validar la bondad del programa desarrollado, hay que tener en cuenta tanto las medidas experimentales realizadas por el CIEMAT en sus laboratorios, como las simulaciones obtenidas tras la implementación del modelo de la célula solar.

Ecuación de Sellmeier

En general, la variación del índice de refracción en función de la longitud de onda se ajusta con la ecuación de Sellmeier. Esta ecuación tiene validez en la región del espectro en la que la absorción del material considerado es despreciable, como es nuestro caso particular. La ecuación es la siguiente:

$$n(\lambda)^2 = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3}$$

Ecuación 3: Ecuación de Sellmeier

Los valores de B_1, B_2 y B_3 y C_1, C_2 y C_3 se determinan de forma experimental y se conocen como los coeficientes de Sellmeier. Y λ se mide en μm y se trata de la longitud de onda en el vacío.

Sin embargo, en el caso particular de este proyecto, se ha utilizado una aproximación a la ecuación descrita, como se explicará en profundidad en el Capítulo 2.

Recubrimiento antirreflectante de doble capa

La restricción más importante que se asocia con el recubrimiento antirreflectante de una sola capa es la falta de disponibilidad de materiales con índices de refracción

adecuados, teniendo en cuenta el sustrato. Además, el revestimiento de una sola capa exhibe una reflectancia mínima o nula en un rango espectral muy estrecho.

El uso de un recubrimiento de dos capas permite cancelar la primera reflexión a través de la interferencia destructiva con dos reflexiones más débiles fuera de fase en las interfaces subyacentes (Ilustración 23). Teniendo esto en cuenta, el objetivo del recubrimiento antirreflectante de doble capa es lograr una reflectancia casi cero o mínima en un rango de longitudes de onda más amplio que el que se obtiene con una sola capa. Particularmente en este proyecto, la reflectancia mínima sería deseable en el rango de λ entre 350 nm y 1200 nm que es donde tiene la respuesta el dispositivo en el que se va a aplicar [5]. Esto se consigue gracias al elevado contraste entre índices de refracción de los materiales que forman el recubrimiento ARC de doble capa. Los materiales más populares empleados son bicapas de sulfuro de cinc (ZnS) con fluoruro de magnesio (MgF), o capas de nitruro de silicio (SiNx).

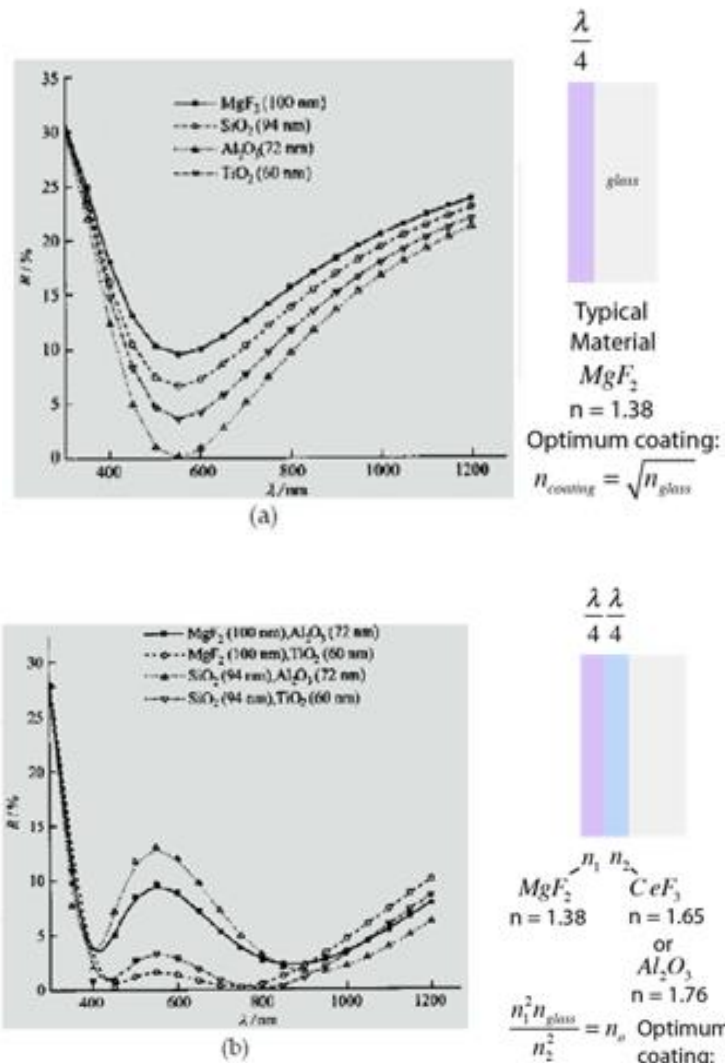


Ilustración 23: Efecto en los espectros de reflectancia según se van añadiendo (a) una capa y (b) dos capas en el recubrimiento

En la Tabla 3 se presentan los índices de refracción de los materiales más utilizados. Una bicapa compuesta por sulfuro de cinc y fluoruro de magnesio tiene la capa de MgF en la parte del dispositivo que está más cerca del aire debido a que el índice de refracción de este material es inferior al de ZnS y, a continuación estaría la capa de sulfuro de cinc. Se puede lograr menor reflectancia cuanto mayor resulte la diferencia de índice de refracción entre los dos materiales.

Materiales	Índice de refracción
MgF	1.39
SiNx	1.87
ZnS	2.1

Tabla 3: Índices de refracción de los materiales más utilizados en recubrimientos

Capítulo 2

Descripción experimental

En este segundo capítulo se va a abordar la implementación del programa de simulación desarrollado en Matlab. Para ello se ha seguido un análisis matemático previo para posteriormente poder comparar las simulaciones obtenidas desde el programa con los datos experimentales de las bicapas facilitados por el CIEMAT.

2.1.- Introducción

El diseño de la capa antirreflectante para una célula solar de silicio repercute directamente en las propiedades ópticas y eléctricas del dispositivo. Las simulaciones que se llevan a cabo incluyen dos capas de recubrimiento antirreflectante, la capa de material de mayor índice de refracción ocupa la posición más cercana al medio activo de silicio, siendo de ITO ($In_2O_3:Sn$) y, la que se encuentra en la superficie del dispositivo, es el AZO ($ZnO:Al$). Estos materiales son óxidos conductores transparentes (OCTs), semiconductores tipo n degenerados, con gran ancho de banda, bajas resistividades y una gran transparencia en el rango espectral del visible, justo donde el silicio tiene su respuesta. El papel de estas películas conductoras transparentes en un dispositivo solar es actuar como una ventana para que la luz pase a través de él y llegue al material absorbente donde se produce la generación de portadores; de la misma manera, al ser materiales muy poco resistivos actúan como contacto óhmico para transportar la carga generada hasta los dedos metálicos.

La optimización de la estructura se llevará a cabo estudiando las propiedades ópticas de la bicapa en función del espesor de las capas que la forman. Para la optimización se tendrán en cuenta parámetros ópticos como la reflectancia y transmisión de la bicapa para,

finalmente, fabricar una célula de heterounión de silicio donde el parámetro a evaluar va a ser la densidad de corriente de cortocircuito, puesto que es el parámetro que se ve afectado por las propiedades ópticas y eléctricas del recubrimiento ARC. En la Ilustración 24 se muestra la estructura de la célula solar que se ha fabricado experimentalmente en los laboratorios del CIEMAT

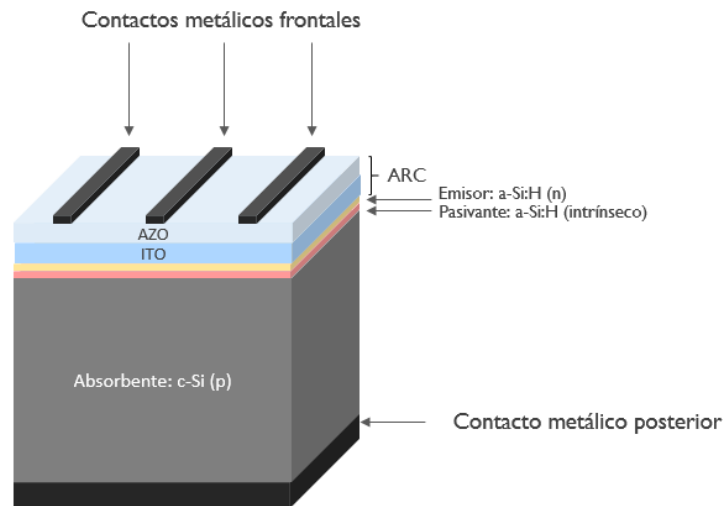


Ilustración 24: Célula solar con una bicapa de AZO e ITO como capa ARC

El análisis anterior se va a desarrollar en el rango de longitudes de onda de 350 nm a 1200 nm, teniendo presente que la zona más importante reside en valores de λ entre 450 nm y 600 nm, ya que es el rango de longitudes de onda donde la Irradiancia solar resulta máxima y donde el silicio tiene su respuesta espectral (Ilustración 25).

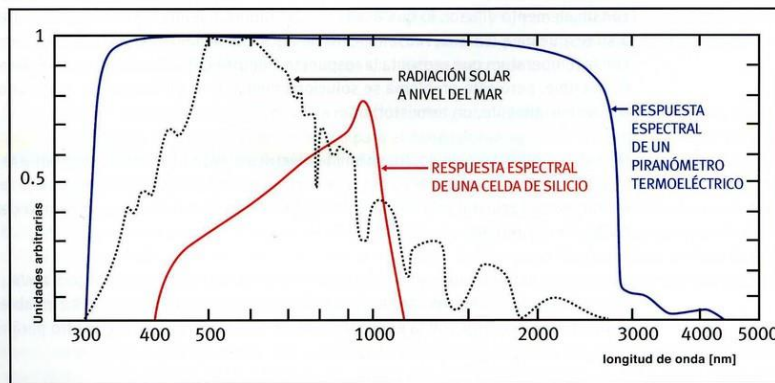


Ilustración 25: Espectro de irradiancia solar y respuesta espectral del silicio

Por último, bajo las longitudes de onda de aplicación en las que se basa el estudio de este proyecto, y se considera nulo el coeficiente de absorción de las capas que constituyen el ARC.

2.2.- Análisis matemático y primeras simulaciones

Es necesario tener en cuenta que en los parámetros que describen al dispositivo solar influyen no sólo las características ópticas del ARC, sino también las eléctricas. Este trabajo se centra en las características ópticas y, para extenderlo a las eléctricas, bastaría con considerar la resistencia de la capa ARC en las características eléctricas del dispositivo, afectando fundamentalmente al valor de V_{oc} .

Como se ha dicho anteriormente, la capa anti-reflectante puede estar formada por muchas subcapas de diferentes materiales, ordenados según sus índices de refracción, con el objetivo de maximizar la transmisión a través de la región de longitud de onda absorbida dentro de la célula solar, minimizando así las pérdidas por reflexión. En la Ilustración 23 se muestra cómo se va modificando el espectro de reflectancia según se van añadiendo láminas de espesor óptico cuarto de onda sobre un sustrato.

Dado que se desea la máxima potencia de salida de la célula solar, el ARC debe diseñarse en términos ópticos para maximizar la densidad de corriente de cortocircuito J_{sc} . Para una célula solar, y en condiciones de luz de incidencia normal [2], la J_{sc} se puede obtener con la Ecuación 4.

$$J_{sc} = q \int \frac{I(\lambda)}{E_{ph}(\lambda)} \cdot T(\lambda) \cdot IQE(\lambda) \cdot d\lambda$$

Ecuación 4: Densidad de corriente de cortocircuito de una célula solar en función de la irradiancia solar incidente, la transmisión del recubrimiento y la eficiencia cuántica interna de la misma

donde I es la irradiancia solar y se mide en W/m^2nm , E_{ph} es la energía del fotón incidente, T representa la transmisión del ARC, IQE es la eficiencia cuántica interna, λ representa la longitud de onda (350 nm - 1200 nm, en nuestro caso) y, por último, q es la carga del electrón expresada en Culombios (C). La J_{sc} se mide en A/m^2 .

Los pasos que se han seguido para hallar la densidad de corriente de la célula en las distintas estructuras de ARC se explican a continuación.

Primera fase: λ , I , IQE y E_{ph}

Para dar comienzo al diseño se crea un array que contiene los valores de λ en el rango que abarca desde 350 nm hasta 1200 nm con un incremento de 10 nm entre cada longitud de onda, de esta forma se van a obtener un total de 86 muestras de cada uno de los parámetros que van a caracterizar a la célula.

Tanto la irradiancia solar (espectro AM1.5G) como la eficiencia cuántica interna (PVCDROM [5]) se han tomado de valores teóricos calibrados. En la Ilustración 26 e Ilustración 27 se muestran las gráficas de los datos, representadas empleando Matlab.

Después se procede a hallar la energía del fotón, para ello se hace uso de la ecuación siguiente:

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \approx \frac{1239.8}{\lambda(nm)} \cdot q(eV)$$

Ecuación 5: Energía del fotón en función de la longitud de onda

siendo q la carga del electrón ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C), y λ la longitud de onda en nm. De nuevo, en la Ilustración 28 se muestra la dependencia de E_{ph} y λ obtenida con el programa de Matlab desarrollado.

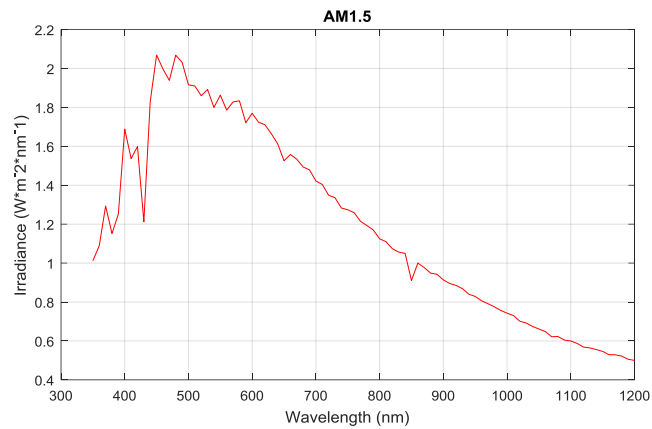


Ilustración 26: Irradiancia solar

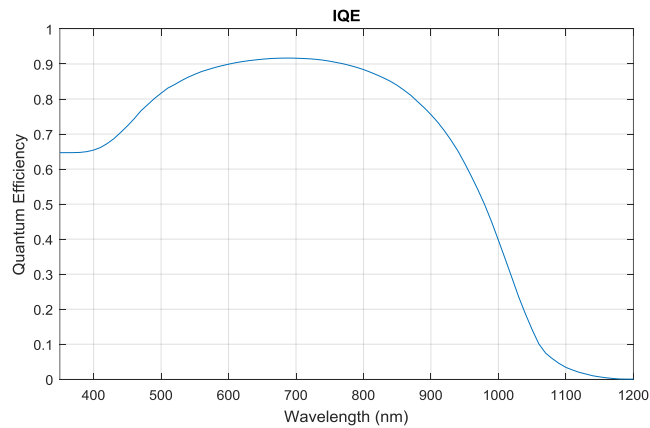


Ilustración 27: Eficiencia cuántica interna [5]

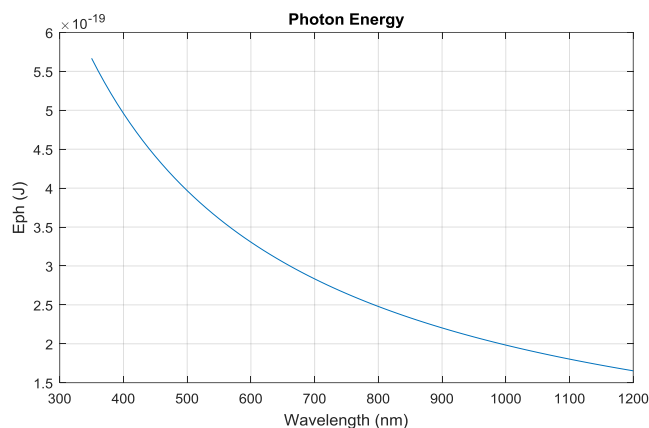


Ilustración 28: Energía del fotón en función de su longitud de onda asociada

Segunda fase: espectros de reflectancia (R) y transmisión (T) especulares

Como se ha señalado anteriormente, los materiales que forman el ARC son los OCTs AZO e ITO que, junto con los substratos de vidrio (espectros de transmisión y reflectancia especulares) y de silicio (en el caso del espectro de reflectancia total) van a ser los diferentes materiales que se van a tener en cuenta a la hora de evaluar las propiedades ópticas del recubrimiento.

Al considerar el recubrimiento antirreflectante de doble capa, las películas están dispuestas de tal manera que los índices de refracción están en el orden, $n_0 < n_1 < n_2 < n_3$, donde n_1 y n_2 los índices de refracción de las capas superior e inferior del revestimiento antirreflectante respectivamente. Del mismo modo, n_0 representa el índice de refracción del aire ($n_0=1$) y n_3 el del substrato (3.8 si es silicio [14] o 1.5 si es vidrio, dependiendo de la medida en este caso). Para obtener simulaciones más precisas, se va a hacer uso de la ecuación de Sellmeier para obtener el valor del índice de refracción de las capas 1 y 2 (n_1 y n_2 , respectivamente) en el rango de longitudes de onda de interés. Como se señaló en el punto 1.4.1, se ha empleado una aproximación a la ecuación en la que se considera sólo una longitud de onda de resonancia λ_0 , que se sitúa cerca del band gap del semiconductor.

$$n^2 = A + \frac{B \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$$

Ecuación 6: Aproximación adoptada a la ecuación de Sellmeier para las capas del ARC

los valores de A , B y λ_0 se muestran en la tabla siguiente. Estos valores se han tomado de estudios anteriores realizados con capas desarrolladas en el CIEMAT. En la Tabla 4 se muestran los valores obtenidos del ajuste para AZO e ITO. Asimismo, en la Ilustración 29 se muestra la variación del índice de refracción con la longitud de onda obtenida mediante la Ecuación 6.

	A	B	λ_0 (nm)
AZO	3.5	0.41	168
ITO	1	2.72	296

Tabla 4: Coeficientes de Sellmeier tomados para las capas del ARC

En el caso del silicio, para hallar el comportamiento de su índice de refracción en función de la longitud de onda, se ha tomado la siguiente aproximación [14]:

$$n_{\text{silicio}}^2 = A + \frac{P}{\lambda^2} + \frac{B \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$$

Ecuación 7: Aproximación adoptada a la ecuación de Sellmeier modificada para el sustrato

	A	B	P	λ_0 (nm)
Silicio	11.68	0.0081	939816	1107.1

Tabla 5: Coeficientes de Sellmeier tomados para el sustrato

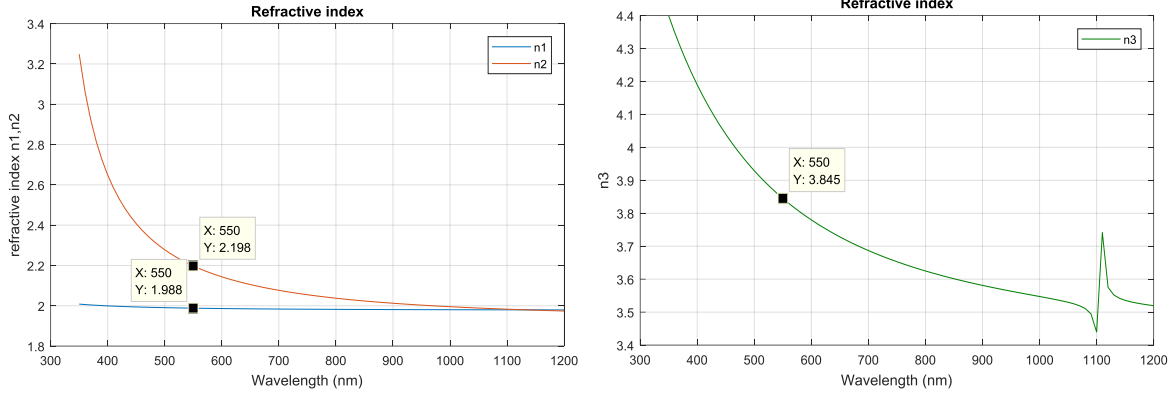


Ilustración 29: Índices de refracción del AZO (n1), del ITO (n2) y del silicio (n3)

Para calcular el espectro de reflectancia del ARC se deben definir unos parámetros previos [5].

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad r_3 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi n_1 t_1}{\lambda} \quad \theta_2 = \frac{2\pi n_2 t_2}{\lambda}$$

Ecuación 8: Parámetros ópticos empleados en la simulación del espectro de reflectancia del ARC

, donde t_1 y t_2 representan los espesores de AZO e ITO respectivamente, r_1 , r_2 y r_3 son los coeficientes de reflexión y θ_1 y θ_2 los ángulos de incidencia que se producen en el medio 1 (AZO) y en el medio 2 (ITO).

Para una primera estimación se van a tener en cuenta tres capas distintas de ARC desarrolladas y caracterizadas en el CIEMAT:

Nombre de la estructura	Características
AWG1	t1= 85 nm y t2= 75 nm
AWG2	t1= 85 nm y t2= 95 nm
AWG3	t2= 80 nm (sin bicapa)

Tabla 6: Estructuras de ARC consideradas a estudio

Finalmente, la reflectancia se calcula a partir de los parámetros obtenidos en la Ecuación 8 utilizando la siguiente fórmula [5]:

$$R = |r^2| = \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_1^2 r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\theta_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos 2\theta_2 + 2r_1 r_3 \cos 2(\theta_1 + \theta_2) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos 2(\theta_1 - \theta_2)}{1 + r_1^2 r_2^2 + r_1^2 r_3^2 + r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\theta_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos 2\theta_2 + 2r_1 r_3 \cos 2(\theta_1 + \theta_2) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos 2(\theta_1 - \theta_2)}$$

Ecuación 9: Reflectancia

Durante el estudio de la célula se considera absorción nula, por lo que la transmisión se puede obtener aplicando:

$$T = 1 - R$$

Ecuación 10: Transmisión de la bicapa

Tercera fase: J_{sc}

En última instancia, se aborda la fórmula expuesta en la Ecuación 4, ya que disponemos de todos los parámetros que aparecen en ella. Se va a tomar 10 como valor para $d\lambda$, puesto que las longitudes de onda van aumentando cada 10 nm, y de nuevo q equivale a la carga del electrón.

2.3.- Mejoras introducidas en el código

Se implementa un nuevo código que va a barrer un rango de espesores de cada una de las capas que componen el ARC; tanto el grosor del ITO como el del AZO van a variar entre 20 nm y 105 nm. Además, se introducen dos nuevos parámetros que van a servir para obtener, más adelante, figuras de mérito útiles para la optimización del diseño ARC. Estas nuevas medidas son la reflectancia ponderada solar y la transmisión promedio en el intervalo de longitudes de onda del visible (350-1200 nm),

$$R_{ponderada} = \frac{\int R(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot d\lambda}{\int I(\lambda) \cdot d\lambda}$$

Ecuación 11: Reflectancia ponderada

$$T_{promedio} = \frac{\sum T}{muestras}$$

Ecuación 12: Transmisión promedio

donde *muestras* equivale al número de muestras que se realizan de cada parámetro, son 86 muestras en total. Definimos la reflectancia media ponderada de la célula solar como la fracción de fotones reflejados del espectro solar y es considerada como una figura de mérito de un ARC. Tal y como se ha indicado anteriormente, la reflectancia que recoge la ecuación 11 es total, pero en las simulaciones se ha escogido la reflectancia especular dada la planaridad de las muestras y por simplicidad para el desarrollo del programa.

Capítulo 3

Resultados

Como se ha dicho anteriormente, en este trabajo, la simulación se utiliza para evaluar la Reflectancia (R) y la Transmitancia (T) del conjunto capa anti-reflectante/substrato, ya que son parámetros importantes que influyen en la reflexión y la transmisión de la célula, de tal forma que su conocimiento nos permitirá diseñar un recubrimiento anti-reflectante adecuado. Estas simulaciones nos permitirán también obtener un máximo de la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}).

Los parámetros de entrada del programa desarrollado son el índice de refracción y el espesor de cada capa. Para estudiar la bondad de las aproximaciones empleadas en el programa así como su correcto funcionamiento, se han simulado tres ARC que han sido depositadas sobre vidrio (Corning Glass, $n=1.50$) a la hora de comparar la transmisión y sobre silicio para comprobar la reflectancia. Del mismo modo han sido caracterizadas experimentalmente en el CIEMAT. Las capas del ARC que se han empleado son la AWG1, AWG2 y AWG3 cuya estructura se encuentra resumida en la Tabla 6. A continuación, se muestra la comparación de las simulaciones de transmitancia y reflectancia obtenidas con el programa desarrollado con las medidas experimentales de reflectancia y transmitancia espectral especulares obtenidas en las capas desarrolladas en el CIEMAT (Ilustración 30, Ilustración 31, Ilustración 32) para las muestras AWG1, AWG2 y AWG3, respectivamente.

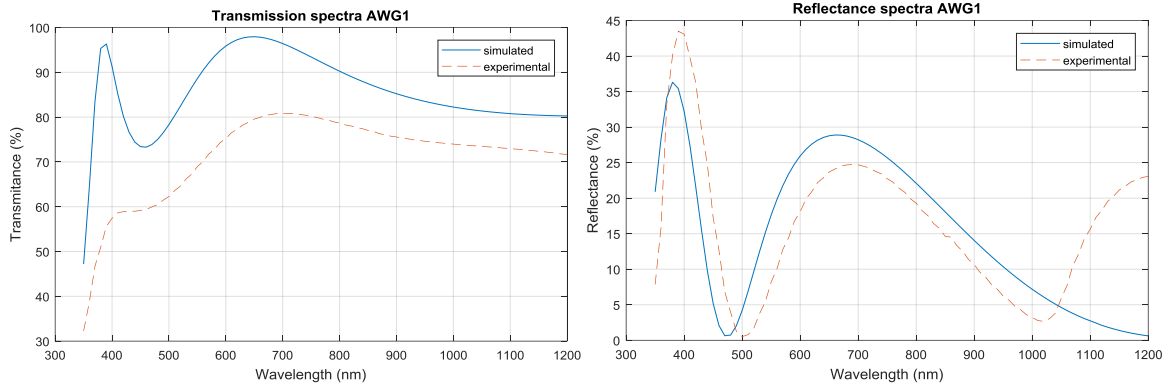


Ilustración 30: Resultados de la simulación vs medidas experimentales (AWG1)

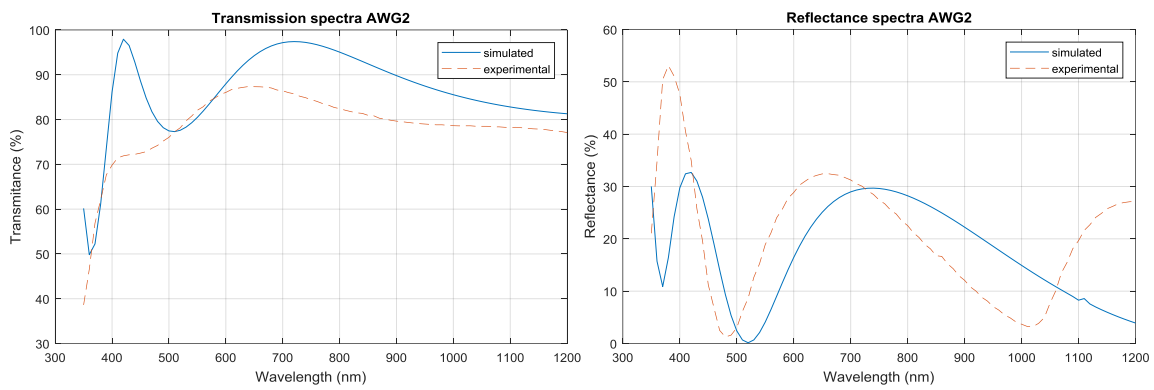


Ilustración 31: Resultados de la simulación vs medidas experimentales (AWG2)

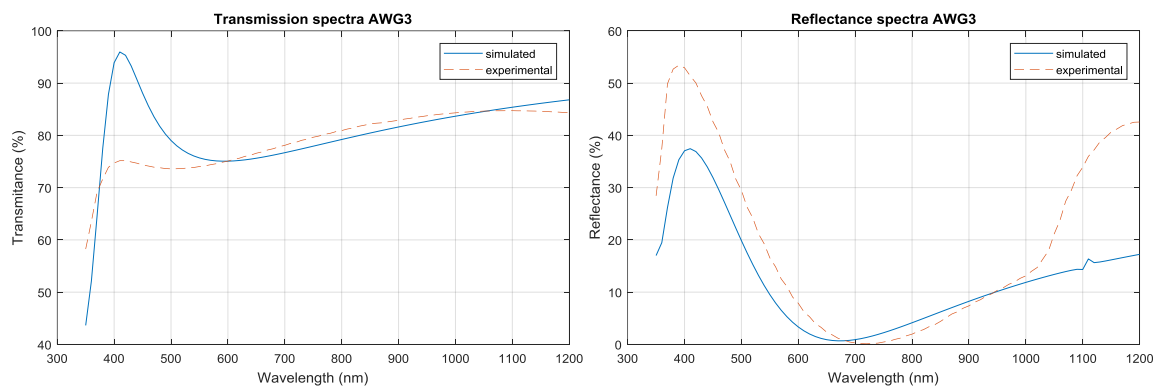


Ilustración 32: Resultados de la simulación vs medidas experimentales (AWG3)

La discrepancia obtenida en los espectros simulados y experimentales se atribuye a efectos de rugosidad en las intercaras, lo que atenúa las oscilaciones observadas en los espectros experimentales en comparación con los simulados. Otra fuente de discrepancia es la diferencia entre el índice de refracción tomado para el ITO y el AZO y el real de las capas, ya que este puede variar ligeramente con la calidad de la capa.

El efecto que tiene el aumento del espesor del semiconductor ITO se observa en la Ilustración 33, se realiza la simulación con 45 nm, 65 nm y 95 nm de ITO, dejando el espesor del AZO fijo a 85 nm. Los valores máximos de la transmisión y los mínimos obtenidos en la reflectancia se desplazan a longitudes de onda mayores.

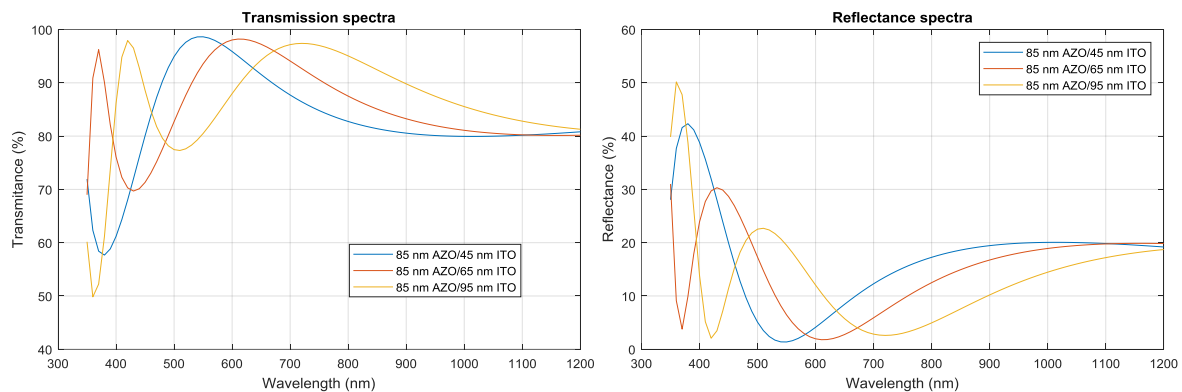


Ilustración 33: Espectros de transmisión y reflectancia de la bicapa sobre vidrio aumentado el espesor de ITO

Del mismo modo ocurre en la Ilustración 34, según aumenta el espesor de la capa de AZO, los valores máximos de transmisión y los mínimos de reflectancia se desplazan hacia longitudes de onda mayores.

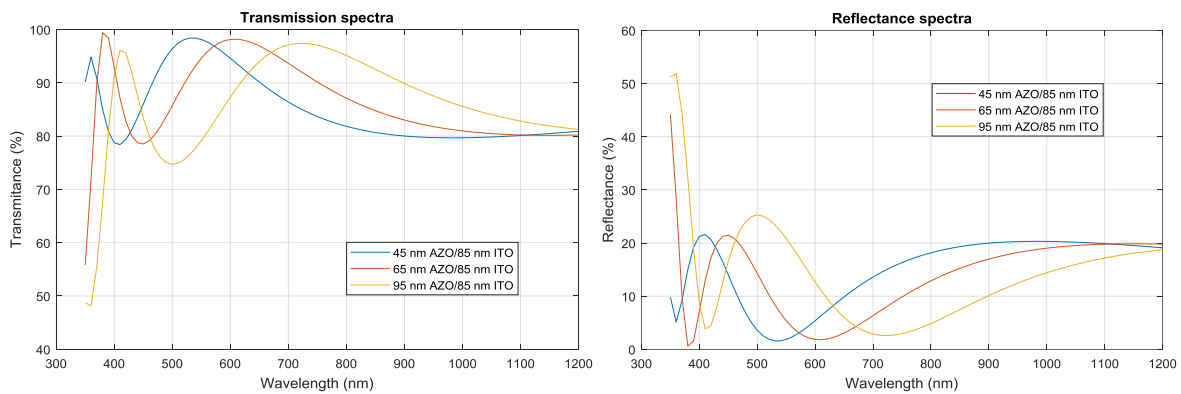


Ilustración 34: Espectros de transmisión y reflectancia de la bicapa sobre vidrio aumentado el espesor de AZO

Por lo tanto, teniendo en cuenta que la irradiancia solar es máxima en valores de λ entre 450 nm y 500 nm (ver Ilustración 26), resulta interesante estudiar la influencia que tendrían los espesores del ARC sobre la eficiencia de la célula solar.

El revestimiento anti-reflectante de doble capa implica dos variables (el grosor de cada capa); luego la optimización debe calcular un gran número de iteraciones para verificar la precisión de nuestra simulación. En cada iteración, se genera un nuevo ARC con una nueva combinación de grosores. Los grosores de los materiales que componen nuestra capa anti-reflectante van a ir aumentando cada 1 nm desde 20 nm hasta llegar a los 105 nm. Los datos obtenidos se van a utilizar para valorar las figuras de mérito de la reflectancia ponderada (Ilustración 35), la transmisión promedio (Ilustración 36) y la densidad de corriente de cortocircuito (Ilustración 37).

La Ilustración 35 muestra el cambio de la reflectancia ponderada total para distintos espesores de AZO e ITO. La región en azul oscuro representa la combinación de espesores de los semiconductores que da como resultado la reflectancia ponderada más baja, obteniendo un valor mínimo de 6.99 %. Por otro lado, la región de color amarillo representa la reflectancia ponderada más alta, con un máximo de 20.19 %. Teniendo en cuenta todo esto, los espesores óptimos de AZO e ITO para obtener la reflectancia ponderada total mínima son 49 nm y 29 nm respectivamente.

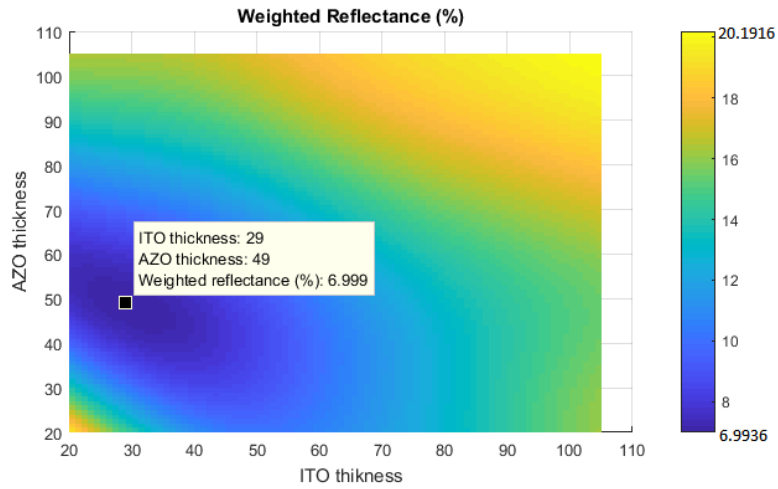


Ilustración 35: Reflectancia ponderada en función de los espesores del AZO y el ITO

Como se observa en la Ilustración 36, la mayor transmisión promedio se logra cuando los dos espesores se encuentran en la región amarilla, llegando a obtener una transmisión promedio máxima de 92.52 % con 56 nm de AZO y 42 nm de ITO.

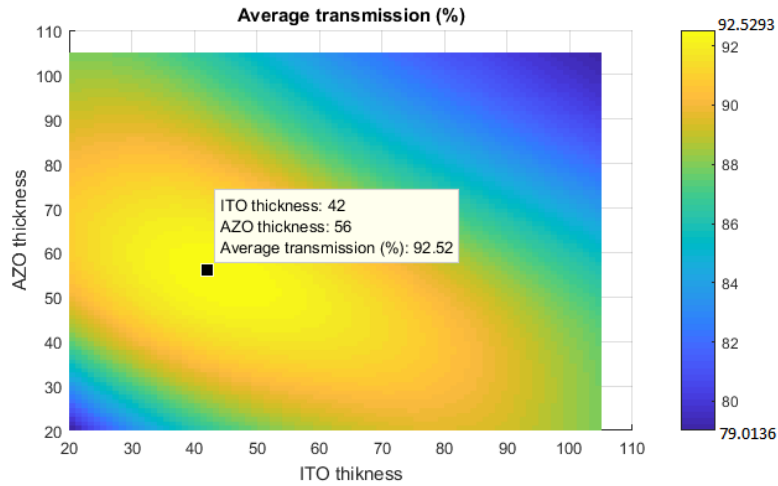


Ilustración 36: Transmisión promedio en función de los espesores del AZO y el ITO

La Ilustración 37 muestra la J_{sc} calculada por el programa teniendo en cuenta la expresión de la Ecuación 4, el máximo valor de J_{sc} se obtiene con un ARC compuesto por 53 nm de AZO y 30 nm de ITO, ya que $J_{sc} = 36.32 \text{ mA/cm}^2$.

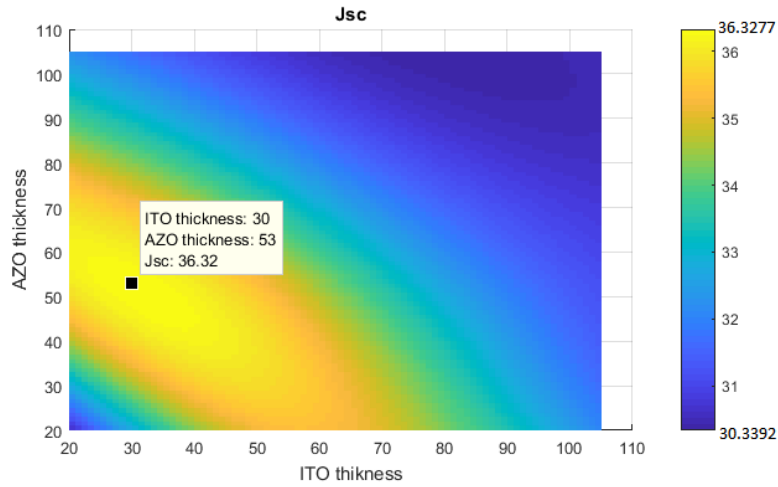


Ilustración 37: J_{sc} en función de los espesores del AZO y el ITO

La Tabla 7 resume los valores óptimos de la reflectancia ponderada, la transmisión promedio y la densidad de corriente en cortocircuito en función del espesor que presentan las capas de AZO e ITO que conforman el ARC.

	Reflectancia ponderada (%)	Transmisión promedio (%)	$J_{sc} (mA/cm^2)$
Valores óptimos	6.99	92.52	36.32
Espesor AZO (nm)	49	56	53
Espesor ITO (nm)	29	42	30

Tabla 7: Optimización del ARC

Los espesores de las capas que llevan a una menor reflectancia ponderada son muy cercanos a los que conducen a una J_{sc} máxima, de ahí que se tome como figura de mérito del ARC. Considerando los resultados obtenidos, los parámetros óptimos de la bicapa analizada que maximizaría la corriente de cortocircuito del dispositivo solar son 53 nm de AZO y 30 nm de ITO.

Capítulo 4

Conclusiones y futuros trabajos

4.1.- Conclusiones

A lo largo de este proyecto, se presentan simulaciones de capas anti-reflectantes para células solares de silicio de heterounión (SHJ) realizadas con un software desarrollado en Matlab. El programa ha permitido obtener los valores de espesores de AZO/ITO que conducen a un valor máximo de R ponderada y J_{sc} , de esta forma se puede optimizar su diseño con el fin de mejorar el rendimiento de la célula solar. Asimismo, las simulaciones muestran un acuerdo suficiente con las medidas de reflectancia y transmitancia especulares de las estructuras de recubrimiento ARC reales, lo que indica la bondad del modelo utilizado.

Basándonos en este enfoque, hemos diseñado un revestimiento anti-reflectante compuesto por dos capas de materiales semiconductores de AZO e ITO. Comparando la estructura del ARC con una única capa de ITO, el ARC de doble capa no solo muestra una reducción pronunciada de la reflectancia, sino que también disminuye el espesor de ITO requerido ópticamente, aumentando la transmisión y por tanto, la fracción de la luz que pueda llegar al absorbente del dispositivo. Para conseguir la configuración de capas óptima de la estructura del ARC que conlleve a maximizar la eficiencia de nuestro dispositivo fotovoltaico se analiza el valor de la J_{sc} , ya que se encuentra directamente relacionada con la cantidad de radiación que llega a la zona activa del dispositivo. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la simulación indica que la estructura de ARC óptima constará de una capa de AZO de 53 nm y, a continuación, una de ITO de 30 nm como se muestra en la Ilustración 24. Con esta estructura de ARC se conseguiría aumentar la densidad de corriente de cortocircuito resultando de utilidad directa para la industria fotovoltaica.

4.2.- Futuros trabajos

Para mejorar el ajuste de los espectros simulados y los experimentales presentados en este trabajo sería necesario introducir en el modelo desarrollado tanto la rugosidad de las intercaras como el coeficiente de absorción de las mismas. Esto permitiría obtener con más fiabilidad los espectros a cortas longitudes de onda.

Entre las mejoras significativas del programa se propone condicionar el índice de refracción de cada medio teniendo en cuenta las técnicas de fabricación del material empleadas, pudiéndonos aproximar así más al caso real. También desarrollar una interfaz gráfica que posea la opción de elegir los parámetros a optimizar y la estructura de la célula con el fin de facilitar al usuario la optimización del dispositivo.

Por último, la caracterización eléctrica de las células sirve para complementar la caracterización óptica. De este modo, una vez que se determina el espesor óptimo de cada una de las capas que conformen el ARC, sería interesante poder abordar el efecto de las propiedades eléctricas de la bicapa, en la característica J-V del dispositivo.

Diagrama de bloques

Para disponer de una vista global del proceso que se ha seguido se adjunta un diagrama de bloques (Ilustración 38) con las diferentes etapas que conforman este trabajo hasta conseguir optimizar la capa anti-reflectante de la célula solar.

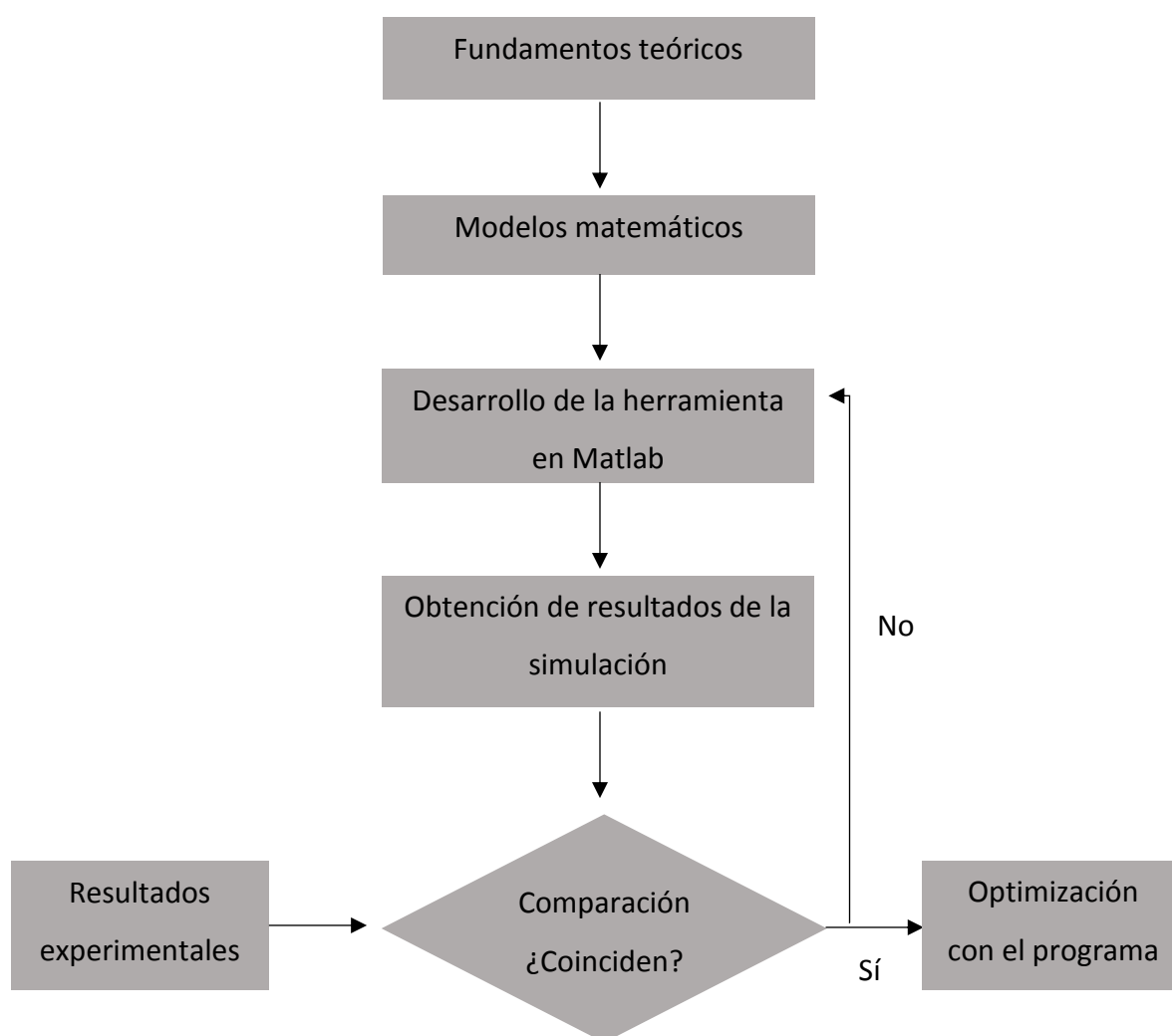


Ilustración 38: Diagrama de bloques del trabajo de fin de grado

Pliego de condiciones

Se ha desarrollado la herramienta de simulación en Matlab R2017a, su software matemático ofrece prestaciones como la manipulación de matrices, representación de funciones e implementación de algoritmos.

Para poder llevar a cabo la verificación de los resultados obtenidos mediante la simulación de nuestra herramienta, han sido necesarias las mediciones experimentales que se han obtenido en los laboratorios en el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) facilitadas por D^a Susana María Fernández. En ellas se recogían también los datos necesarios para la caracterización de la célula. Gracias a estos valores de entrada se ha podido proceder a la implementación y simulación de la célula solar de silicio en Matlab.

Finalmente, el hardware que se ha utilizado es un PC portátil modelo ASUS A55V, con un procesador Intel[®] Core[™] i7 para llevar a cabo las simulaciones de la herramienta y el desarrollo del proyecto. Además, el equipo de medida utilizado por el CIEMAT para obtener los espectros de transmisión y reflectancia especular es el Espectrofotómetro LAMBDA 1050 UV/Vis [16].

Presupuesto

Presupuesto de ejecución material

A lo largo de este apartado se va aportar el presupuesto de ejecución material, más conocido como PEM. La información sobre el presupuesto se elabora haciendo uso del coste de los materiales utilizados y las tasas por mano de obra. Asimismo, se considera una amortización de 5 meses para los materiales que se han utilizado, correspondiente a la duración del proyecto en cuestión.

Mano de obra

Objeto	Periodo (meses)	Salario mensual (€)	TOTAL (€)
Graduado	5	1.300	6.500
		Suma	6.500

Materiales

Objeto	Unidades	Precio unidad (€)	TOTAL (€)
Ordenador	1	1.000/5años	83.33
Material de oficina	1	150	150
Microsoft Windows 7	1	0	0
MATLAB Student License	1	125	125
Microsoft Office	1	100	100
		Suma	458,33

PEM

Concepto	TOTAL (€)
Mano de obra	6.500
Materiales	458,33
Suma	6.958,33

Presupuesto de ejecución por contrata

El presupuesto de ejecución por contrata (PC) se encuentra compuesto por el PEM, los gastos generales, el beneficio industrial y los honorarios de dirección y redacción.

Concepto	Valor	Total (€)
PEM	1	6.958,33
Gastos Generales y Beneficio Industrial	15% PEM	1.043,75
Honorarios de redacción	7% PEM	487,08
Honorarios de dirección	7% PEM	487,08
	Suma	8.976,25

Presupuesto total

El coste total del proyecto se obtiene aplicando el IVA al presupuesto de ejecución por contrata calculado en la tabla anterior. De esta forma, el presupuesto total del proyecto asciende a la cantidad de *diez mil ochocientos sesenta y un euros con veintiséis céntimos*, 10.861,26 €.

Concepto	Total (€)
PC	8.976,25
IVA (21%)	1.885,01
Suma	10.861,26

Manual de usuario

Configuración del proyecto inicial

A continuación se muestra una secuencia de pasos a seguir para configurar el proyecto inicial en Matlab.

1. Crear un nuevo proyecto seleccionando *New Script* como viene indicado en la Ilustración 39. Una vez hecho esto, te aparecerá en blanco un editor de texto sin nombre “*Untitled*” (Ilustración 40); va a ser ahí donde introduzcas el código del programa a ejecutar. En la esquina superior izquierda se dispone de la opción *Save*, úsala para guardar tu proyecto. Además, hay otras tres ventanas que van a resultar importantes a lo largo de la ejecución del programa: *Command Window* se utilizará para enviar las instrucciones que se quieran ejecutar, *Current Folder* va a mostrar el contenido de la carpeta donde se está trabajando y *Workspace* va a enseñar toda la información necesaria a cerca de las variables y objetos definidos en nuestro programa.
2. En el programa “*var_t1t2.m*” desarrollado, los parámetros que se pueden editar para optimizar el diseño son los índices de refracción n_1 (AZO), n_2 (ITO), n_3 (Silicio o Corning Glass) modificando las líneas de código de la Ilustración 41 y los espesores de la bicapa que conforma el ARC t_1 (AZO) y t_2 (ITO) redefiniendo el intervalo de valores que se desea y el salto (Ilustración 42).
3. Una vez introducidas las líneas de código que se desean ejecutar, se pulsa *Run* como viene indicado en Ilustración 43. Cuando el programa acaba de ejecutarse aparecerán en *Workspace* las variables que se han declarado en las líneas de código. Para mandar algún comando simplemente hay que escribirlo tras el símbolo `>>` que se encuentra en *Command Window*. Para visualizar el contenido de las variables del programa, vale con pulsar dos veces en la variable como se muestra en la Ilustración

44. Al lado de la ventana de *Editor* aparecerá inmediatamente otra ventana llamada *Variables*; se podrá ver el contenido completo del objeto seleccionado.

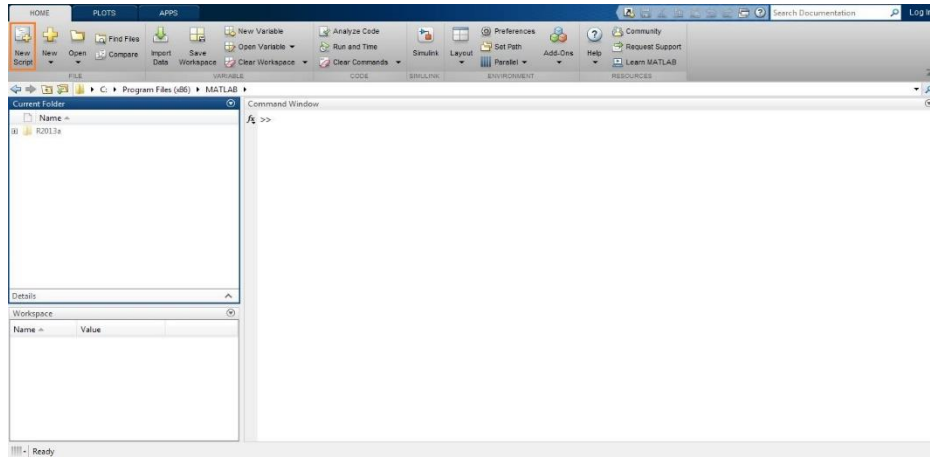


Ilustración 39: Crear nuevo proyecto en Matlab

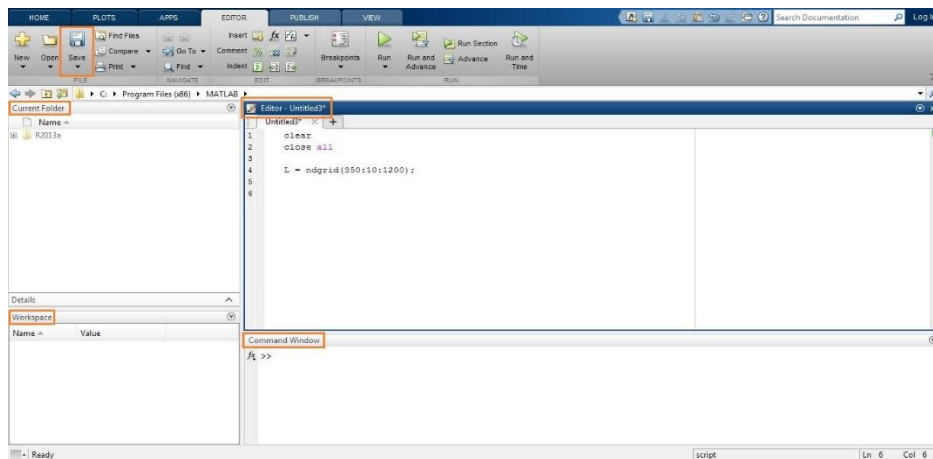


Ilustración 40: Desarrollar y editar el programa en Matlab

```

%Sellmeier
%AZO
A1=3.5;
B1=0.41;
L01=168;

%ITO
A2=1;
B2=2.72;
L02=296;

%Silicio
A3=11.68;
B3=0.0081;
L03=1107.1;
P=939816;

n0=1;
n1=(A1+((B1*(L.^2))./(L.^2-(L01.^2))))^(1/2);
n2=(A2+((B2*(L.^2))./(L.^2-(L02.^2))))^(1/2);
n3=(A3+(P./(L.^2)+(B3*(L.^2))./(L.^2-(L03.^2))))^(1/2);

```

Coeficientes de Sellmeier para AZO e ITO (Tabla 4)

Coeficientes de Sellmeier para Silicio (Tabla 5)

Ecuación 6 (n_1 y n_2)
Ecuación 7 (n_3)

Ilustración 41: Código del programa de Matlab usando la ecuación de Sellmeier

```

e1= 20:1:105;
e2= 20:1:105;
for i=1:size(e1,2)
    for j=1:size(e2,2)
        t1=e1(i);
        t2=e2(j);

```

Desde 20 nm hasta 105 nm
cada 1 nm

Ilustración 42: Código del programa de Matlab con un rango específico de valores de espesores de la bicapa

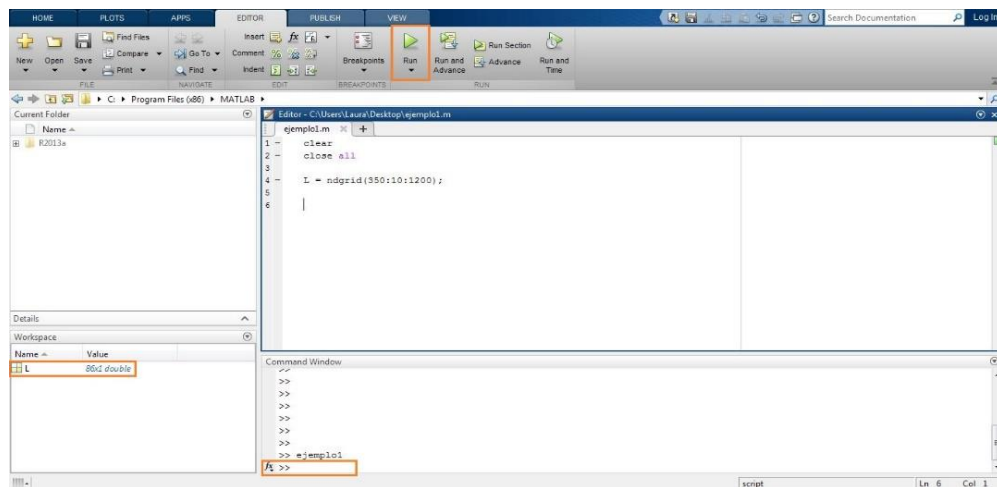


Ilustración 43: Ejecutar el programa en Matlab

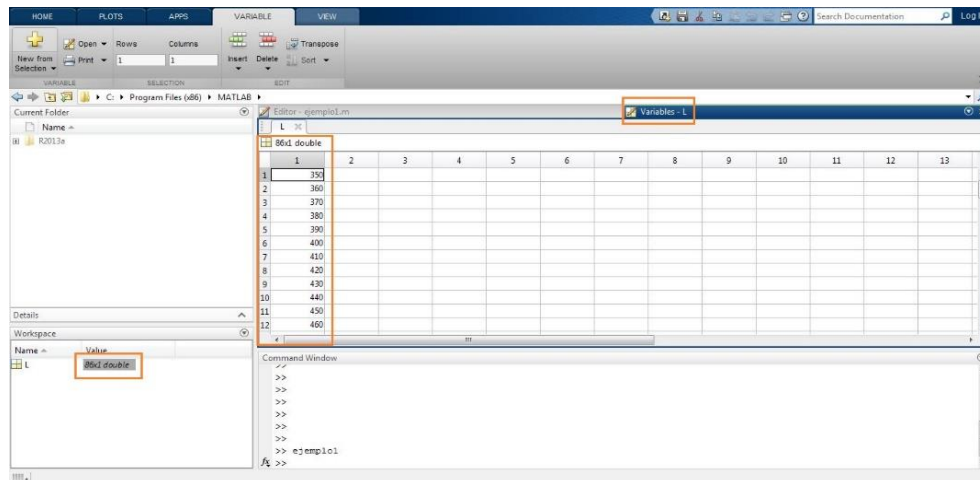


Ilustración 44: Visualizar el contenido de las variables en Matlab

Mostrar y editar figuras

Existen muchas formas de mostrar el contenido de una variable, dependerá del resultado que se quiera obtener. En este proyecto se ha optado por tres instrucciones distintas:

- Plot()
- Stem()
- Surf()

Si en el programa has utilizado alguna función que sirva para mostrar figuras, al seleccionar *Run* aparecerán en la pantalla del ordenador todas las figuras. A continuación se expone un ejemplo de la función `surf()` para explicar cómo jugar con la edición de una figura.

En la Ilustración 45 se han marcado los puntos de mayor interés a la hora de mostrar una figura en Matlab. Para introducir título a la figura se usa `title('Título')` y para los ejes vale con hacer uso de la instrucción `xlabel('Título')`, siendo la x el eje que queremos nombrar.

En la parte superior derecha hay un icono que se llama *Show Plot Tools*, si se selecciona se abre una ventana como la de la Ilustración 46. Una vez aquí se pueden cambiar los colores de la figura, moverla para seleccionar el ángulo deseado o introducir un mapa de colores.

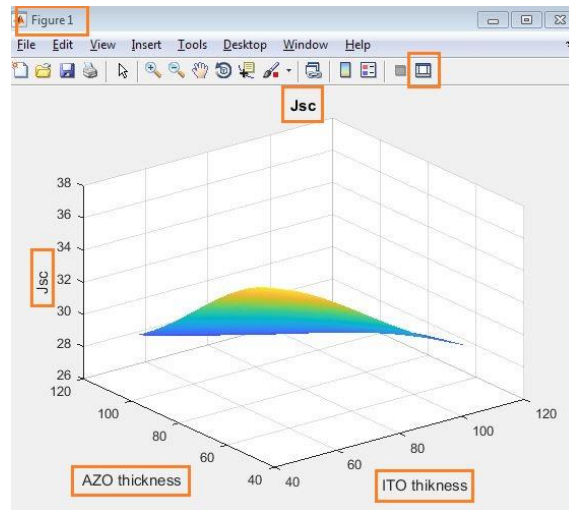


Ilustración 45: Modificar nombre de los ejes en una figura de Matlab

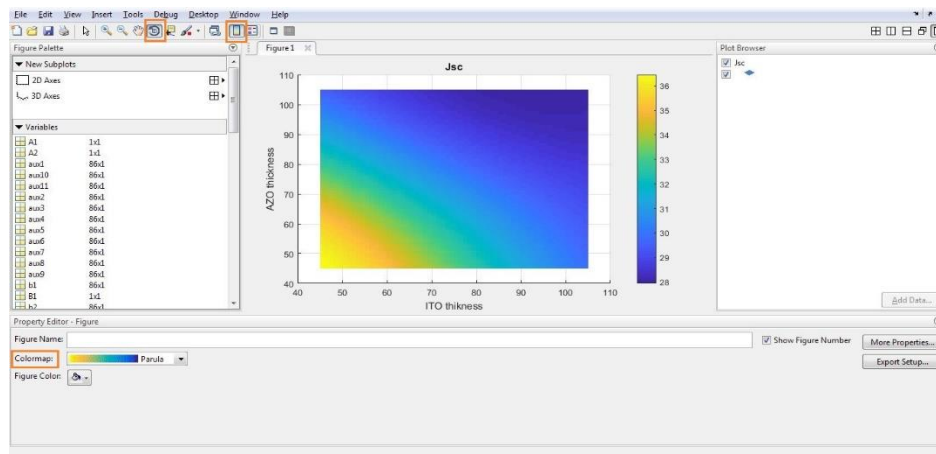


Ilustración 46: Cambiar escala de colores en una figura de Matlab

Para modificar el mapa de colores se pulsa con el botón derecho del ratón en la barra que se encuentra seleccionada en la Ilustración 47. Después, se escoge la opción *Open*

Colormap Editor y aparecerá la ventana con el nombre *Colormap Editor*. Desde aquí se pueden observar los límites que toma nuestra variable.

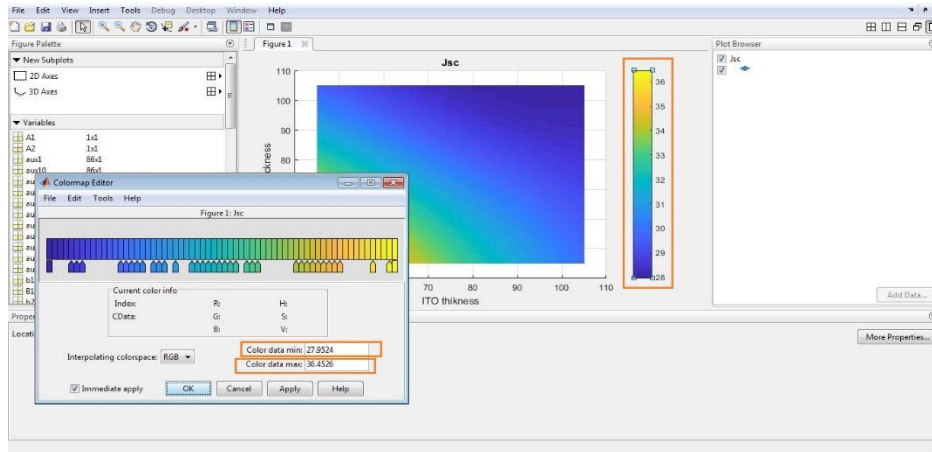


Ilustración 47: Visualizar máximos y mínimos en una figura de Matlab

Bibliografía

- [1] P. Sánchez-Friera, «Unidad 3 - Materiales y procesos de fabricación de células fotovoltaicas,» Junio 2011. [En línea]. Available: <http://ocw.unia.es/ciencias-tecnologicas/tecnologia-de-celulas-y-modulos-fotovoltaicos/Materiales/unidad-3>.
- [2] C. E. Valdivia, E. Desfonds, D. Masson, S. Fafard, A. Carlson, J. Cook, T. J. Hall y K. Hinzer, «Optimization of antireflection coating design for multi-junction solar cells and concentrator systems,» Center for Research in Photonics, University of Ottawa, Ottawa, Canada.
- [3] I. Ardhi Digdaya, «Optical Enhancement for Heterojunction Silicon Solar Cells,» Master of Science Thesis, Delft University of Technology, Noviembre 2012.
- [4] R. E. Rojas Hernández, «Caracterización espectral de células,» Trabajo Fin de Máster, Universidad de Salamanca, Salamanca, Junio 2011.
- [5] PVEducation, «Photovoltaic Education Network,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.pveducation.org/>.
- [6] «Tres generaciones de celdas solares, México,» [En línea]. Available: http://www.esco-tel.com/3_generaciones_de_celdas_fotovoltaicas.html.
- [7] Departamento técnico de SunFields Europe, «www.sfe-solar.com,» [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/celula-fotovoltaica-tipos-y-estructura/>.

- [8] M. G. Escrivá, «Eficiencia límite en la conversión de la energía solar mediante,» Universidad Politécnica de Catalunya, 2003.
- [9] María Jesús Martín Martínez, «Crecimiento, preparación y caracterización de materiales electrónicos,» Universidad de Salamanca, [En línea]. Available: http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/materiales-electronicos/contenido/MaterialesElectronicos/Tema_2_CrecimObl.pdf.
- [10] José Lo. Balenzategui Manzanares, «Máster en Energías Renovables y Mercado energético, Tecnologías fotovoltaicas en lámina delgada,» 2007/2008. [En línea]. Available: <https://www.eoi.es/es/file/18331/download?token=mE738QzD>.
- [11] «EcuRed,» [En línea]. Available: <https://www.ecured.cu/Semiconductores>.
- [12] José Antonio E. García Álvarez, «asifunciona.com,» 2012. [En línea]. Available: http://www.asifunciona.com/fisica/ke_semiconductor/ke_semiconductor_3.htm.
- [13] Alberto Casado Bregón, «Tesis Doctoral, Contactos con células de heterounión de silicio,» Departamento de Física de Materiales (UCM), 2017. [En línea]. Available: <http://eprints.ucm.es/41978/1/T38593.pdf>.
- [14] I. L.-V. Blanco, «Desarrollo de un sistema de medidas ópticas con automatización mediante LabWindows,» Proyecto Fin de Carrera (Especialidad ITT, SE), Universidad de Alcalá, 2013.
- [15] D. F. Edwards and E. Ochoa, Infrared refractive index of silicon, Applied Optics, 1980.
- [16] E. L. 1. AV/Vis. [En línea]. Available: <http://www.perkinelmer.com/es/product/lambda-1050-uv-vis-nir-spectrophotometer-l1050>.

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá